

**IB 131-2014/94**

**Induktive Vorverklebung von  
Versteifungsprofilen an gekrümmten  
Hochleistungsstrukturbauteilen aus CFK**

Philipp Zapp, Hakan Ucan



**Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik  
Braunschweig**

Dezember 2015



IB 131-2014/94

**Induktive Vorverklebung von Versteifungsprofilen an  
gekrümmten Hochleistungsstrukturbauteilen aus CFK**

Braunschweig, *Dec. 2015*

Der Bericht umfasst:

100 Seiten

Institutsleiter:  
Prof. Dr.-Ing. M. Wiedemann



Leiter der Abteilung:  
Prof. Dr.-Ing. M. Wiedemann



Verfasser:  
Philipp Zapp



Hakan Ucan





# **Diplomarbeit I**

## **Induktive Vorverklebung von Versteifungsprofilen an gekrümmten Hochleistungsstrukturbauteilen aus CFK**

Vorgelegt von:	Philipp Zapp
Matrikel-Nummer:	28226154
Vorgelegt am:	21.01.2016
Institut:	Institut für Produktionstechnik und Logistik Fachgebiet Trennende und Fügende Fertigungsverfahren
Erstgutachter	Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Stefan Böhm
Zweitgutachter	Dipl. Ing. Stephan Völkers
Betreuer:	Dipl.-Ing. Holger Thiede  Dipl.-Ing. Hakan Ucan Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.



## **Geheimhaltungserklärung**

Diese Diplomarbeit darf weder vollständig noch auszugsweise ohne schriftliche Zustimmung des Autors, des betreuenden Referenten bzw. der Firma xy vervielfältigt, veröffentlicht oder Dritten zugänglich gemacht werden. Das Fachgebiet für Trennende und Füge-Fertigungsverfahren behält sich alle Rechte zur Nutzung dieser Arbeit im Rahmen von Forschung und Lehre vor.

---

**Prof. Dr.-Ing. Stefan Böhm**

---

**Philipp Zapp**

## Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen benutzt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder noch nicht veröffentlichten Quellen entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht. Die Zeichnungen oder Abbildungen in dieser Arbeit sind von mir selbst erstellt worden oder mit einem entsprechenden Quellenachweis versehen. Diese Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keiner anderen Prüfungsbehörde eingereicht worden.

Kassel, 21.01.2016

---

**Vorname Nachname**

# Inhaltsverzeichnis

Geheimhaltungserklärung .....	II
Aufgabenstellung .....	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>
Erklärung .....	III
Inhaltsverzeichnis .....	IV
Abbildungsverzeichnis .....	VI
Tabellenverzeichnis .....	VIII
Abkürzungsverzeichnis .....	IX
1 Einleitung .....	1
1.1 Einführung .....	1
1.2 Motivation zur induktionsbasierten Vorverklebung von Versteifungselementen .....	3
1.3 Zielsetzung und Struktur der Arbeit .....	4
2 Theoretische Grundlagen.....	7
2.1 Grundlagen der Verklebung .....	7
2.2 Grundlagen der induktiven Erwärmung .....	9
2.3 Grundlagen der Faserverbundtechnologien .....	12
2.3.1 Preformtechnologie.....	12
2.3.2 Bauteilaushärtung .....	14
2.4 Zusammenfassung .....	17
3 Stand der Technik.....	18
3.1 Fertigungskette von versteiften Flugzeugsegmenten aus CFK.....	18
3.2 Positionierung und Fixierung von Versteifungselementen .....	19
3.3 Verklebung von Versteifungssegmenten .....	23
3.4 Einsatz der Induktionstechnologie in der Industrie .....	24
3.5 Nachgeschaltete Qualitätssicherung .....	28
3.6 Zusammenfassung .....	29
4 Vorstellung genutzter Anlagen und Materialien .....	30
4.1 Anlagen .....	30
4.1.1 Laser-Projektions-Anlage.....	30
4.1.2 Induktionsanlage.....	31
4.1.2.1 Frequenzgenerator .....	31
4.1.2.2 Induktor.....	32
4.2 Autoklav .....	33



4.3	Sensorik (Thermokamera, Software).....	36
4.4	Materialien (Faserverbund, Hilfsstoffe, Klebefolie) .....	38
5	Experimentelle Untersuchungen .....	39
5.1	Bauteilfertigung .....	39
5.2	Positionierung und Fixierung von Versteifungselementen .....	41
5.3	Vorverklebung von Versteifungselementen .....	47
5.3.1	Versuchsreihe 1 - Verklebung der Coupons.....	48
5.3.2	Versuchsreihe 2 – Verklebung von Stringern in der Ebene .....	52
5.3.3	Versuchsreihe 3 – Verklebung von Stringern in einem Full Scale Schalenausschnitt .....	55
5.4	Ergebnisse und Auswertung der Versuche .....	58
5.4.1	Auswertung Versuch 1 .....	59
5.4.2	Auswertung Versuch 2.....	63
5.4.3	Auswertung Versuch 3.....	65
5.5	Mechanische Analyse der Verklebung .....	66
5.6	Zusammenfassung .....	71
6	Validierungsversuch.....	73
6.1	Bauteilfertigung Demonstrator Rumpftonne {GroFi} .....	73
6.2	Verklebung der Versteifungselemente .....	75
6.2.1	Detektierung der Stringerposition.....	75
6.2.2	Positionierung und Fixierung von Versteifungselementen .....	76
6.2.3	Induktionsverklebung .....	77
6.3	Ergebnisse und Interpretation .....	78
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	80
7.1	Zusammenfassung .....	80
7.2	Ausblick .....	81
8	Literaturverzeichnis .....	IX
Anhang	.....	XII

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Airbus A350 [3].....	2
Abbildung 2: Nieten und Kleben von Stringern und Spanten aus CFK [4] .....	2
Abbildung 3: Prozessablauf der Verklebung von Stringern [5] [8] .....	3
Abbildung 4: Induktive Vorverklebung von Versteifungselementen [38].....	4
Abbildung 5: Struktur der Arbeit .....	5
Abbildung 6: Zusammenhänge der Grundlagen .....	7
Abbildung 7: Klebstoffeinteilung [14].....	8
Abbildung 8: Adhäsion und Kohäsion .....	8
Abbildung 9: Funktionsprinzip der Induktion [19] .....	10
Abbildung 10: Induzierter Wirbelstrom in eine Leiterschleife [33] .....	11
Abbildung 11: Herstellungsverfahren Faserverbund [22] [23].....	12
Abbildung 12: schematische Darstellung Lösungsmittelimprägnierung [23] .....	13
Abbildung 13: Vakuumaufbau Autoklavprozess [23] .....	15
Abbildung 14: Typischer Autoklavzyklus [24].....	15
Abbildung 15: Fertigungskette versteifter Flugzeugsegmente [5] [23].....	18
Abbildung 16: Positionierungssysteme [25] [26] [28] .....	19
Abbildung 17: Stringerpositionierung [25] .....	20
Abbildung 18: Aufnahme Werkzeug nach FFT EDAG [26].....	21
Abbildung 19: Stringerpositionierung Airbus [26].....	22
Abbildung 20: Stringerpositionierung DLR [28].....	23
Abbildung 21: Prozess mit induktionswärmeerzeugenden Materialien [29] .....	25
Abbildung 22: Wärmeeintrag in FV-Bauteil [30].....	26
Abbildung 23: Faserverstärkte Klebung [31] .....	26
Abbildung 24: SPF mittels Induktion [32] .....	27
Abbildung 25: Induktion und Leiterschleifen [33] .....	28
Abbildung 26: LPT Projektionsdarstellung [34] .....	30
Abbildung 27: Frequenzgenerator Iff Ismaning GmbH [42] .....	31
Abbildung 28: Schematische Kennlinienveränderung bei unterschiedlichen Pulsweiten [15] .....	32
Abbildung 29: Induktionskopf Iff GmbH [38].....	33
Abbildung 30: Allg. Darstellung des Heiz- und Lüftungssystems eines Autoklaven [10].....	34
Abbildung 31: DLR Stade Autoklav [5].....	36
Abbildung 32: FLIR A315f Thermokamera [39] .....	37
Abbildung 33: Formwerkzeuge zur Bauteilherstellung [38].....	39
Abbildung 34: Schneiden der Prepreglagen [38] .....	40
Abbildung 35: Messmittel zur Positionierung von Versteifungselementen .....	41
Abbildung 36: Positionierung Versteifungselemente Lineal [38].....	42
Abbildung 37: Positionierung Versteifungselemente Schablone [38] .....	43
Abbildung 38: Positionierung Versteifungselemente Abstandshalter [38] .....	43
Abbildung 39: Mittel zur Fixierung von Versteifungselementen .....	44
Abbildung 40: Fixierung von Versteifungselementen mit Magneten [38].....	46
Abbildung 41: Vorgehensweise zur Einstellung der Induktionsparameter.....	47
Abbildung 42: Schritt 1 Vorverklebung.....	49
Abbildung 43: Versuchsaufstellung.....	50
Abbildung 44: Versuch 1 - Verklebung Coupons (FLIR A315f Thermokamera) [38].....	51
Abbildung 45: Induktionsprozess thermografisch dargestellt.....	51
Abbildung 46: Schritt 2 Vorverklebung.....	52

Abbildung 47: Querschnitt von Omega-Stringern mit integriertem Stringerschlauch [35] .....	53
Abbildung 48: Versuch 2 - Fixierung; induktive Verklebung [38] .....	54
Abbildung 49: Versuch 2 - senkrechter Vakuumaufbau [38].....	55
Abbildung 50: Schritt 3 Vorverklebung.....	56
Abbildung 51: Versuch 3 - Stringerpositionierung in der Rumpfschale [38] .....	56
Abbildung 52: Versuch 3 - Induktive Vorverklebung [38] .....	57
Abbildung 53: Versuch 3 – Schlauchkerntechnik [38].....	58
Abbildung 54: Induktion nach Zeit und Leistung .....	59
Abbildung 55: Induktion nach Frequenz.....	60
Abbildung 56: Vergleich Co-/ Secondary Bonding .....	62
Abbildung 57: Vergleich zwischen Heizelement und Induktion.....	63
Abbildung 58: Temperaturen nach der induktiven Erwärmung (Versuch 2) .....	64
Abbildung 59: Laserprojektion von Stringergeometrien in der Rumpfschale .....	65
Abbildung 60: Induktive Verklebung in der Rumpfschale thermografisch dargestellt.....	66
Abbildung 61: Schematischer Aufbau eines Zug-Scher-Versuches [36] .....	67
Abbildung 62: Zugscherversuch der induktiv verklebten Proben mit Bezug auf die Induktionsparameter, die für die Verklebung verwendet wurden.....	68
Abbildung 63: Zugscherversuch der induktiv verklebten Proben mit Bezug auf die Temperaturen, die bei der Verklebung gemessen wurden.....	69
Abbildung 64: Zugscher-Proben nach der Prüfung.....	70
Abbildung 65: Zugscherproben nach Variation der Frequenz .....	71
Abbildung 66: Schritt 4 Vorverklebung.....	73
Abbildung 67: Fertigung der Rumpfschale im Fiberplacement-Verfahren.....	74
Abbildung 68: Versuch 4 - Laserprojektion Stringerelement [38].....	76
Abbildung 69: Auftrag des Klebefilms auf die Klebeflächen des Stringers [38] .....	76
Abbildung 70: Induktiv vorverklebte Versteifungselemente in der Rumpfschale [38] .....	77
Abbildung 71: Vollständig verklebte Rumpfschale [38].....	78
Abbildung 72: Überprüfung der Stringerposition nach dem Autoklavzyklus [38] .....	79

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übertragbare Leistungsdichten [8] .....	10
Tabelle 2: Technische Daten des Autoklaven BALU, DLR Stade [5] .....	34
Tabelle 3: Materialtabelle .....	38
Tabelle 4: Tests Magneten - Schale in Werkzeug .....	46
Tabelle 5: Tests Magneten - Stringer in Schale .....	46
Tabelle 6: Versuch 3 - Neueinstellung Parameter Secondary Bonding.....	57
Tabelle 7: Versuch 3 - Neueinstellung Parameter Co Bonding .....	57
Tabelle 8: Datenauswertung bei 50°C .....	68

## **Abkürzungsverzeichnis**

CFK	– Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
DIN	– Deutsches Institut für Normung
EN	– Europäische Norm
MF	– Mittelfrequent
Plug'n'Play	– Eigenschaft, Geräte ohne Einstellungen adaptieren zu können
ZLP	– Zentrum für Leichtbau- und Produktionstechnologie

# 1 Einleitung

## 1.1 Einführung

Seit vielen Jahren und spätestens mit Beginn der Debatte um den Klimawandel spielt das Thema Leichtbau in der Forschung und Entwicklung eine übergeordnete Rolle. Größere Kapazitäten und höhere Traglasten, aber zugleich leichter, sparsamer und vor allem schonender für die Umwelt sollen die Fahrzeuge in der Luft- und Raumfahrt, in der Logistik und auch im Automobilbau werden. Faserverbunde und im Speziellen kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK), sollen dem Erreichen dieser Ziele und Dimensionen ergänzend beisteuern. Durch das Zusammenspiel alternativer und weiterentwickelter Antriebskonzepte, stetig verbesserter Aerodynamik und Oberflächentechnologie als auch dem Leichtbau und vieler weiterer Aspekte werden so neue Maßstäbe gesetzt.

Demgegenüber bringt der Einsatz viele Herausforderungen mit sich, da sich die Vorteile der Faserverbundwerkstoffe nur dann richtig einbringen lassen, wenn sie effizient und nachhaltig eingesetzt werden. In Form verschiedener Leichtbauweisen werden Konzepte durch die Verbindung verschiedener Konstruktionsformen und den dafür geeigneten Werkstoffen umgesetzt. Die Wahl der Bauweise wird im Allgemeinen durch Rahmenbedingungen wie die Anwendung, Kosten, Sicherheitsanforderungen oder Fertigungsmöglichkeiten bestimmt. In der Luftfahrt werden Schalensysteme in Form der integrierenden Bauweise konstruiert. Das bedeutet, dass mehrere Kleinbauteile gebaut und anschließend einander gefügt werden müssen. Diese haben einen immer weiter wachsenden Anteil an Faserverbundwerkstoffen. [\[1\]](#)

Im Gegensatz zur jahrzehntelangen Erfahrung in der Metallverarbeitung fehlt jedoch das Wissen im Umgang mit dem Werkstoff CFK. Die Herausforderung bei diesem Prozess besteht darin, die Faserverbundbauteile auf effiziente Art und Weise miteinander zu verbinden, wofür mehrere Verfahren zur Auswahl stehen. Dabei beschränkt sich das Fügen in der Luft- und Raumfahrt sowie im Automobilbau und in vielen anderen Bereichen schon längst nicht mehr hauptsächlich auf das kraft- oder formschlüssige Fügen.

Keine ganz neue, aber mittlerweile sehr vielversprechende und in den letzten Jahren enorm weiterentwickelte Methode, um Bauteile und verschiedene Werkstoffe miteinander zu verbinden, ist die Technologie des Klebens. Trotz jahrelanger Anwendung in der Industrie stellt sie immer noch gesonderte Aufgaben an die Fertigungsmethoden. Das Kleben eröffnet den Ingenieuren die Möglichkeit, unterschiedliche Werkstoffe miteinander zu verbinden, ohne dabei eine Beschädigung des Gefüges oder der Materialoberfläche hervorzurufen, wie es beim Schweißen oder Nieten der Fall ist. Vor allem aber für den Einsatz von CFK-Bauteilen in der Luftfahrt ist das Kleben ein potentieller Fertigungsschritt, wie es am Beispiel des Airbus A350 (Abbildung 1) zu sehen ist.



Abbildung 1: Airbus A350 [3]

Der dortige Einsatz von Niet- als auch Klebeverbindungen zeigt, dass Faserverbundbauteile durch beide Verfahren haltbar miteinander verbunden werden können. Jedoch ist das Nietverfahren bereits hochentwickelt und vollständig automatisiert, sodass nach Brenner et al. [2] kein Entwicklungspotenzial mehr besteht, da keine weiteren Produktivitätsfortschritte oder Gewichtseinsparungen zu erwarten sind.

Demgegenüber können durch die Technologie des Klebens höhere Festigkeiten erreicht und die Produktionszeiten verkürzt werden. Durch die ganzflächige Krafteinleitung in das Bauteil wächst die Energieaufnahme und steigert die statische und dynamische Belastbarkeit. Als besondere Herausforderung beim Kleben gelten allerdings die zahlreichen Einflussfaktoren, die langen Produktionszeiten sowie die Qualitätssicherung. Aufgrund des bestehenden Entwicklungspotentials werden Klebeverbindungen aber vermehrt eingesetzt und mit neuartigen Technologien und Verfahren weiterentwickelt. Abbildung 2 stellt eine Rumpfschale aus CFK mit verklebten und vernieteten Versteifungselementen dar. [1]



Abbildung 2: Nieten und Kleben von Stringern und Spanten aus CFK [4]

Das Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP) in Stade beschäftigt sich mit der Entwicklung und Integrierung von Strukturbauteilen aus CFK in Form verschiedener Startprojekte. Das ZLP ist eine nationale Forschungseinrichtung des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt e.V. und ist entlang der gesamten Prozesskette für Bauteile aus Faserverbund aufgestellt. Am DLR-Standort Stade stehen dafür die Forschungsanlagen GroFi (**G**roßbauteile im **F**iberpalcementverfahren), OnQA (**O**nline **Q**ualitätssicherung im **A**utoklaven) sowie EVo (**E**ndkonturnahe **V**olumenbauteile im RTM Prozess) zur Verfügung. Die Verklebung von Strukturbauteilen aus CFK wird dabei in dem Startprojekt OnQA weiterentwickelt. [5]

Im Rahmen eines EU-Projektes werden die Ziele der Gewichts- und Kostenreduzierung sowie der Optimierung der Aerodynamik von Flugzeugen verfolgt. Dabei fokussiert sich das Projekt auf die Bereiche der zulässigen Verformung, der Selbstanalyse durch intelligente Netzwerke und den multifunktionalen Strukturen. Um die Fertigungstechnologien für ihren Einsatz in der Serie zu erproben, werden sie an dafür gebauten full scale Demonstratoren getestet. Eine dieser Fertigungstechnologien beinhaltet das Thema der effizienten Verklebung von Versteifungselementen. [6]

## 1.2 Motivation zur induktionsbasierten Vorverklebung von Versteifungselementen

Bei der Entwicklung von Flugzeugen wird auf eine leichte Konstruktionsweise Wert gelegt. Dabei bringt die Versteifung von tragenden Elementen, wie der Rumpfschale, gegenüber der Massivbauweise enorme Gewichtsvorteile mit sich, bedeutet jedoch, dass die Elemente mit der Primärstruktur in Verbindung gebracht werden müssen. Die Versteifungen in Längs- und Querrichtung werden in Form von Stringern und Spanten realisiert. Nach aktuellem Stand der Technik werden die Elemente in Längsrichtung zeitaufwändig mittels Heizelementen (engl. heating device) vorverklebt und anschließend in einem Autoklaven vollständig verklebt. Die Elemente in Querrichtung werden vernietet.

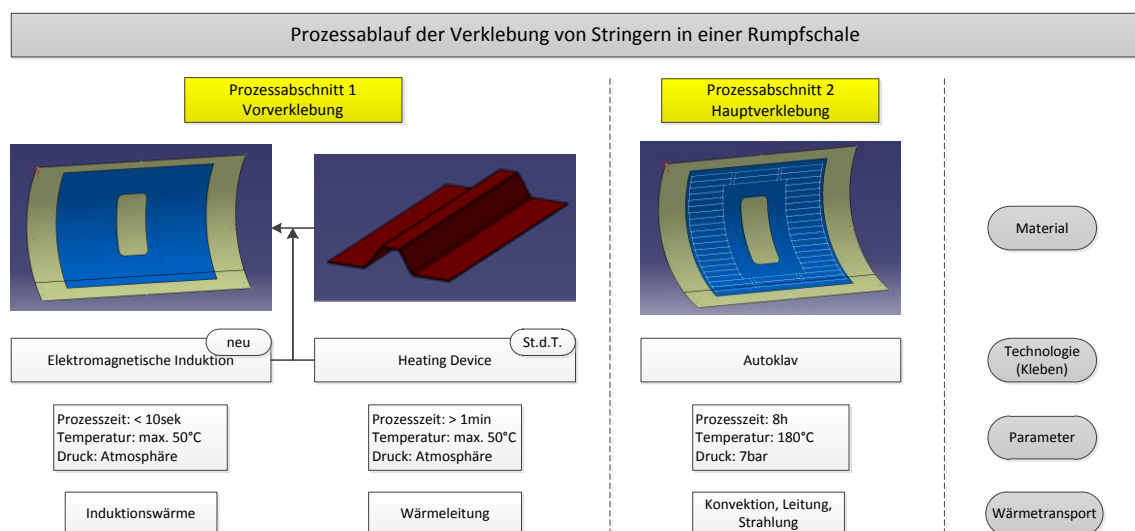


Abbildung 3: Prozessablauf der Verklebung von Stringern [5] [8]



Abbildung 3 veranschaulicht den zweistufigen Prozess der Verklebung und geht dabei auf die Prozesstechniken sowie deren Parameter ein. Der Fokus dieser wissenschaftlichen Arbeit liegt dabei in dem Bereich der Vorverklebung von Versteifungselementen. Der aktuelle Prozess der Verklebung wird in zwei Stufen ausgeführt und wird wie oben beschrieben in die Vorverklebung und die Hauptverklebung unterteilt. Dabei weist die Vorverklebung ein enormes Entwicklungspotential auf, da der Klebstoff zwischen den Bauteilen zeitaufwendig mittels einfacher Heiztechnik erwärmt wird. Des Weiteren ist dieser Prozessschritt wenig automatisiert und bedarf der Handarbeit. Hinzu kommt, dass CFK einen ohnehin geringen Wärmeleitkoeffizienten zwischen 15-40 (W/mK) besitzt – im Vergleich hierzu liegt der Wert von Aluminium bei 236 (W/mK) - und durch die Erwärmung mittels Wärmeleitung zusätzlich lange Taktzeiten verursacht. Dadurch gestaltet sich die Verklebung zeitlich sehr ineffizient. Bei jährlich 480 weltweit produzierten Flugzeugen mit über 100000 Stringern entstehen somit hohe Produktionskosten. Durch eine technische Weiterentwicklung sowie einer Automatisierung des Systems sind enorme Fortschritte denkbar. [9] [47]

Das wesentliche Kennzeichen der Induktionserwärmung gegenüber den konventionellen Erwärmungsverfahren ist nach Benkowsky et al. [8], dass die Wärme unmittelbar im Werkstück erzeugt und nicht durch Konvektion, Strahlung oder Wärmeleitung übertragen wird. Dabei werden deutlich größere Leistungen als bei anderen Erwärmungsverfahren erreicht und Möglichkeiten geboten, die durch andere Wärmebehandlungstechniken nicht erreicht werden. Die Technologie der induktiven Erwärmung verspricht somit ein enormes Potential in Bezug auf kürzere Aufheizzeiten und eine Automatisierung des Prozesses.



Abbildung 4: Induktive Vorverklebung von Versteifungselementen [38]

### 1.3 Zielsetzung und Struktur der Arbeit

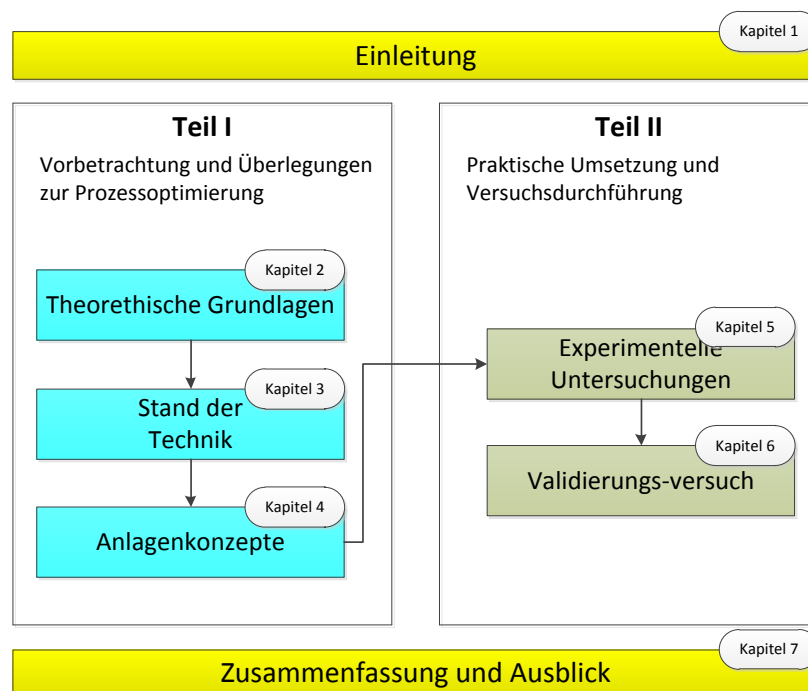
Leichtbaukonzepte sind in der Konzeption und Realisierung meist sehr kostenaufwendig, weshalb das Ziel dieser Arbeit in der Ermittlung der Vor- und Nachteile der induktiven Erwärmung besteht. Durch den Einsatz der Induktionstechnologie wird eine enorme Zeiterparnis bei mindestens gleichbleibender Klebequalität erwartet. Der Prozess bietet meh-

rere Möglichkeiten der Automatisierung, die nachfolgend auf den Ergebnissen und Erkenntnissen dieser Arbeit aufbauen kann.

Ein beim DLR entwickeltes und patentiertes Vorverklebungskonzept bildet die Grundlage dieser wissenschaftlichen Arbeit. Dabei wird von einem Verfahren zur Herstellung eines Bauteiles aus mindestens zwei miteinander verklebten Faserverbundbauteilen gesprochen. Die Bauteile werden im ersten Schritt aneinander geheftet, indem die Klebeschicht zwischen den Bauteilen durch das Einstrahlen eines elektromagnetischen Wechselfeldes erwärmt wird. In einem zweiten Schritt wird die Klebeverbindung in einem Autoklaven vollständig ausgehärtet. [11]

Die Herausforderung liegt in der Integration der Induktionstechnologie in den aktuellen Prozessschritt. In einer Machbarkeitsanalyse inklusive einer Parameterstudie sollen die Induktionsparameter für die Vorverklebung untersucht, sowie ihre Abhängigkeit der Einflussfaktoren bestimmt werden. In Bezug auf die Automatisierung und Integrierung des Prozesses in die Fertigungsanlagen werden kürzere Taktzeiten und ein insgesamt effizienterer Prozess angestrebt. Weiterhin ist durch die Realisierung dieser Prozessverbesserungen eine Kostensenkung durchaus vorstellbar. [12]

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel und kann inhaltlich in zwei Hauptteile gespalten werden. Die folgende Abbildung 5 soll einen kurzen Überblick über den Aufbau der Arbeit geben.



**Abbildung 5: Struktur der Arbeit**

Kapitel [1](#) verschafft dem Leser vorerst eine themenübergreifende Einführung in die Problematik und stellt das Thema der Leichtbaukonstruktionen im Flugzeugbau näher vor.

Um ein grundlegendes Verständnis für die Thematik dieser Arbeit zu vermitteln, beschäftigt sich Kapitel [2](#) mit den theoretischen Grundlagen der hier angewandten Technologien.

In Kapitel [3](#) wird der aktuelle Stand der Technik anhand einer Fertigungskette für versteifte Flugzeugsegmente aus CFK dargestellt. Daran sollen Probleme herausgefiltert werden um den Verbesserungsbedarf und das Entwicklungspotential aufzuzeigen. Für die anstehenden Untersuchungen werden in Kapitel [4](#) die Anlagen und benötigten Materialien vorgestellt.

Zunächst werden Voruntersuchungen durchgeführt um die optimalen Prozesseinstellungen zu finden. Die Einstellung der Parameter und die Entwicklung des Prozesses werden in Kapitel [5](#) beschrieben. Die Ergebnisse daraus werden im Anschluss auf die Versuche in der Rumpfschale übertragen. Das Vorgehen und die Reproduzierbarkeit sind in Kapitel [6](#) beschrieben.

Die Arbeit schließt in Kapitel [7](#) mit der Zusammenfassung der Ergebnisse und einem schlussfolgernden Ausblick ab.

## 2 Theoretische Grundlagen

Um Schwachstellen und Potentiale eines Prozesses detektieren zu können, ist es notwendig über die theoretischen Grundlagen zu verfügen. Daher werden in diesem Kapitel die Ergebnisse der Literaturrecherche zusammengefasst. Diese Arbeit baut auf den drei essentiellen Hauptthemen der induktiven Erwärmung, der Verklebung und den Faserverbundtechnologien auf. Abbildung 6 soll dabei die Zusammenhänge der Themen aufzeigen.

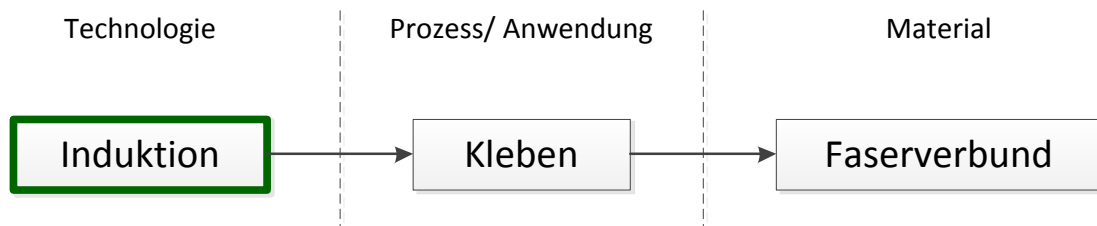


Abbildung 6: Zusammenhänge der Grundlagen

### 2.1 Grundlagen der Verklebung

Die Historie des Klebens reicht bis 8000 v. Chr. zurück. Zu jener Zeit benutzten die Menschen bereits Naturklebstoffe und machten sich deren Klebwirkung zu Nutzen. Es vergingen viele Jahre bis 1500 erstmals Kautschuk verwendet wurde und 1700 die erste Leimfabrik entstand. Erst Mitte des 20. Jahrhunderts wurden die uns bekannten klebtechnischen Produkte wie Klebeband und Sekundenklebstoff entwickelt. [\[13\]](#)

Als echter Entwicklungsmotor für die Klebtechnik gilt derzeit der „*Leichtbau*“. Das Ziel, mehr und mehr Gewicht einzusparen zwingt die Ingenieure weitreichende Lösungen zu finden. Das Kleben eröffnet dabei neue Gestaltungsmöglichkeiten, die es erlauben neuartige Strukturkonzepte umzusetzen und das Gewichtspotential zu realisieren. Allerdings ist zu erwähnen, dass in vielen Bereichen der Kunststoffverarbeitung das Kleben das einzig anwendbare stoffschlüssige Fügeverfahren ist. Letztendlich können neue Werkstoffe und Werkstoffkombinationen nur zur industriellen Anwendung kommen, sofern entsprechende Fertigungsverfahren existieren. Durch das vielversprechende Potenzial wurden in den letzten Jahren vor allem in der Luft- und Raumfahrtindustrie viele Fortschritte gemacht.

Da Klebstoffe sehr komplexe Systeme sind und in ihrem Aufbau, den Eigenschaften und den Anwendungen teils große Unterschiede bestehen können, werden sie nach bestimmten Kriterien unterschieden. Zum einen erfolgt die Einteilung nach der chemischen Basis, wobei von organischen und anorganischen Verbindungen die Rede ist. Zum anderen wird nach dem Abbinde Mechanismus unterschieden. Klebstoffe können auf verschiedene Arten reagieren und ihre Wirkung entfalten. Dabei gibt es chemisch reagierende sowie physikalisch abbindende Klebstoffe als auch reaktive Schmelzklebstoffe. Abbildung 7 veranschaulicht eine detaillierte Einteilung. [\[14\]](#)

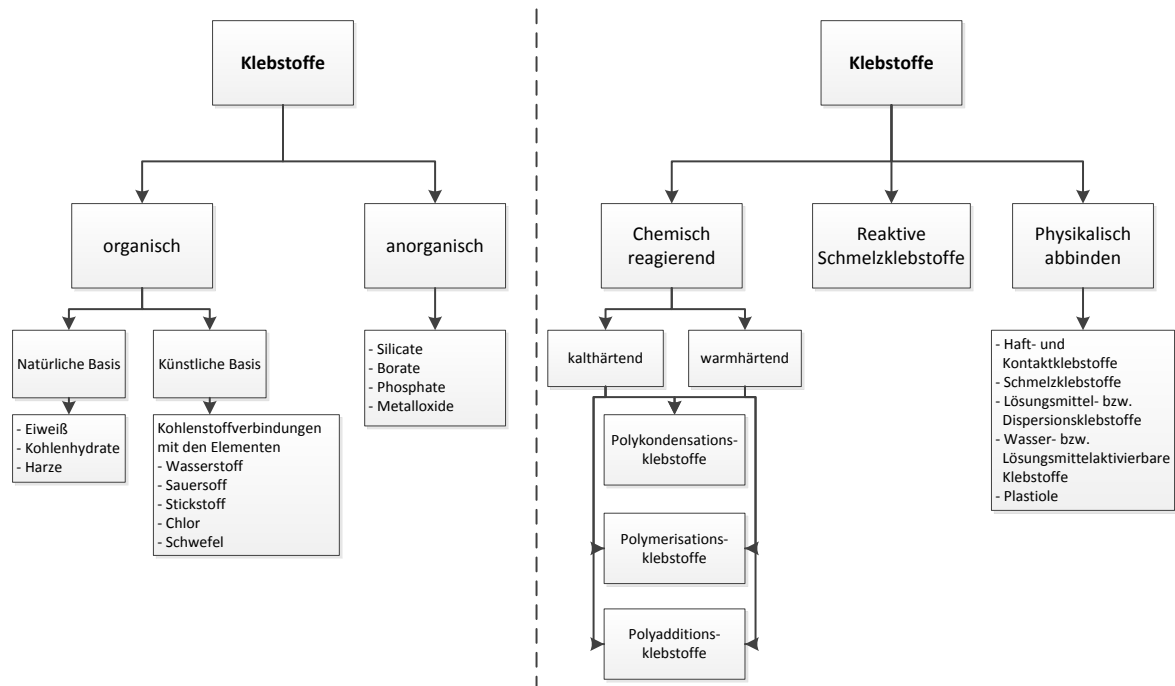


Abbildung 7: Klebstoffeinteilung [14]

Unabhängig von der Basis und dem Abbinde Mechanismus besteht bei allen Klebstoffen dasselbe Funktionsprinzip. Die Haftung basiert auf dem Grundsatz der Adhäsion und Kohäsion. Unter der Adhäsion bei Klebstoffen versteht man die Haftkräfte zwischen der Füge teiloberfläche und dem Klebefilm durch Molekularkräfte. Die Kohäsion wiederum bezeichnet die Bindungskräfte zwischen den Atomen und Molekülen im Klebefilm selbst. Für ein besseres Verständnis wird im Folgenden bildlich das Prinzip des Klebens dargestellt.

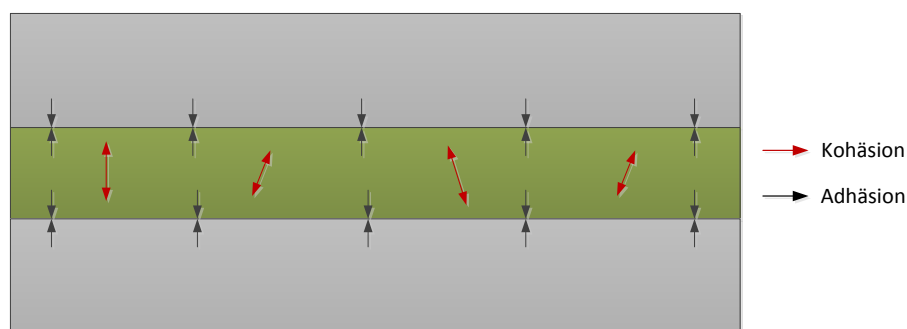


Abbildung 8: Adhäsion und Kohäsion

Gegenüber konventionellen Verbindungstechniken hat das Kleben mannigfaltige Vorteile und ist deshalb so wertvoll für die Leichtbaukonstruktionen. Besonders die flächige Krafteinleitung, die durch die Klebefläche gegeben ist, bewirkt eine hohe statische und vor allem dynamische Belastbarkeit. Des Weiteren besteht die Möglichkeit verschiedene Materialkombinationen aus metallischen, nichtmetallischen, natürlichen und künstlichen Materialien herzustellen und dauerhaft miteinander zu verbinden. Vor allem für die Einbin-

dung von Kunststoff- oder Faserverbundbauteilen in metallische Strukturen ist das Kleben von besonderer Bedeutung. Bei einer geklebten Metallverbindung erweist sich der Klebstoff zusätzlich als Isolier- und Dämmstoff und schützt beispielsweise vor Kontaktkorrosion. Als weiteren Vorteil ist herauszustellen, dass besonders im Vergleich zu Schweißverbindungen weder Gefügeveränderungen durch zu hohe Wärmezuvor, noch Bauteilschädigungen durch benötigte Bohrungen für Nieten, etc. am Bauteil ausgeübt werden. Insbesondere im Flugzeugbau ist diese Eigenschaft von großer Bedeutung, da die dort eingesetzten Aluminiumbauteile die Hitzeeinwirkung des Schweißens nicht schadensfrei überstehen würden. So profitieren auch die Verbindungen von wärmeempfindlichen Bauelementen.

Die Problematik beim Kleben liegt jedoch in den zahlreichen und komplexen Einflussfaktoren, die die Güte bestimmen sowie in der nachgeschalteten Qualitätskontrolle solcher Klebeverbindungen. Die Zeit, in der der Klebstoff aushärtet und seine Festigkeit ausbildet, bildet ein Problem für den Fertigungsablauf und behindert diesen im Vergleich zu den konventionellen Verfahren. Wichtig für die Qualität der Klebung sind dabei vor allem die Oberflächenbeschaffenheit und deren Vorbehandlung. Das Entfernen fettiger Partikel sowie korrosiver Medien auf den zu verklebenden Flächen ist Grundvoraussetzung für eine fehlerfreie Vernetzung zwischen Klebstoff und Kontaktflächen. Die Klebeschichten weisen zwar ein relativ inertes chemisches Verhalten auf, können aber durch verschiedenste Einflussfaktoren wie UV-Licht, Wärme, Feuchtigkeit, statische und dynamische Kräfte sowie Chemikalien beeinflusst werden und zu einer beschleunigten Alterung und folglich zum Versagen führen. Des Weiteren weisen sie eine schlechte thermische Beständigkeit auf und sind daher nur bedingt bis zu einer bestimmten Temperatur einsatzfähig. Eine sorgfältige Prozesskontrolle sollte zwar bei allen Fügeverfahren gegeben sein, ist jedoch beim Kleben von besonderer Bedeutung, da die Oberflächenvorbehandlung, die Klebstoffmischung, der Auftrag sowie die Aushärtung sehr genau aufeinander abgestimmt sein müssen. Lediglich durch eine ständige und penible Kontrolle kann eine reproduzierbare und qualitative Klebung gewährleistet werden.

Mit Bedacht der Vor- und Nachteile ist mit dem Einsatz von Klebeverbindungen eine in vielerlei Hinsicht optimale Lösung zum Fügen mehrere Bauteile gefunden. Das spiegelt sich vor allem in den Anwendungsbereichen wieder. Derzeit gibt es kaum einen industriellen Bereich, in dem das Kleben nicht zum Einsatz kommt. Um nur ein paar Beispiele zu nennen, findet das Kleben vor allem in der Luft- und Raumfahrttechnik, dem Fahrzeugbau, im einfachen Maschinenbau oder auch in der Textilindustrie Anwendung. [\[1\]](#) [\[13\]](#) [\[14\]](#)

## 2.2 Grundlagen der induktiven Erwärmung

Die induktive Erwärmung beruht auf dem Prinzip der Induktion nach Michael Faraday. Er nutzte „... das Entstehen eines elektrischen Potentials (einer elektrischen Spannung) entlang einer Leiterschleife durch die zeitliche Änderung des magnetischen Flusses“. Damit zeigte er, dass durch einen sich bewegenden Magneten innerhalb einer Spule Strom erzeugt werden kann. Neben der von Faraday erstmals gezeigten Induktion der Bewegung

(Generatorprinzip) existiert ebenso die Induktion der Ruhe (Transformatorprinzip), bei der sich der Magnet in Ruhe befindet. [16]

Die induktive Erwärmung kann in vereinfachter Form durch das Funktionsprinzip des Transformators erklärt werden. In der Regel besteht dieser aus einem magnetischen Kreis (Transformator Kern) und mindestens zwei Spulen, sodass zwei Stromkreise magnetisch gekoppelt werden. Dabei wird in Primär- und Sekundärseite unterschieden, da die Primärspule der Energiequelle zugewandt ist und von der Quellwechselspannung durchflossen wird und auf seitens der Sekundärspule die elektrische Last anliegt. Sobald auf der Primärspule eine Wechselspannung anliegt, bewirkt diese einen wechselnden magnetischen Fluss im Kern. Dieser wiederum induziert auf der Sekundärseite eine Spannung und somit die Spannungstransformation. Das dabei wechselnde elektromagnetische Feld wird direkt in das Werkstück eingebracht und führt zur Entstehung von Wirbelströmen. Diese leisten am Ohm'schen Widerstand des Werkstücks eine Leistung, die in Form von Wärme abgegeben wird. [17] [18]

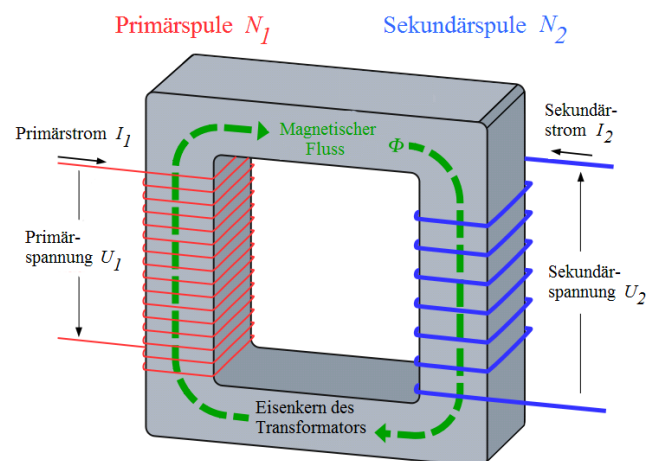


Abbildung 9: Funktionsprinzip der Induktion [19]

Anhand der nachfolgenden Tabelle 1 soll veranschaulicht werden, wie die übertragbare Leistungsdichte im Vergleich zu anderen Methoden besteht. Dabei soll die Effizienz der Induktionserwärmung aufgezeigt werden. [20]

Erwärmungsart	Leistungsdichte in $[\text{W}/\text{cm}^2]$
Konvektion	0,5
Strahlung	8
Wärmeleitung	20
Infrarot-Punktstrahler	$2 \times 10^2$
Flamme	$10^3$
<b>Induktionserwärmung</b>	<b><math>10^4</math></b>
Laser ( $\text{CO}_2$ )	$10^8$
Elektronenstrahl	$10^{10}$

Tabelle 1: Übertragbare Leistungsdichten [8]



Die Erwärmung von Metallen und Kohlenstofffasern unterscheidet sich dabei durch die unterschiedlichen Wirkmechanismen. Die Erwärmung der metallischen Bauteile entsteht durch ohmsche Verluste und Hystereseeffekte, während die Erwärmung bei Kohlenstofffasern durch dielektrische Erwärmung und Kondensatoreffekte hervorgerufen wird. Allgemein kann jedoch gesagt werden, dass die bereitgestellte Energie, der Widerstand, die spezifische Wärmekapazität sowie die Masse des Materials den Wirkungsgrad des Induktionsprozesses bestimmen.

Bei der induktiven Erwärmung von Metallen werden durch die Erzeugung eines elektromagnetischen Feldes Wirbelströme in dem zu erwärmenden Bauteil hervorgerufen. Dabei erwärmt sich das metallische Bauteil über ohmsche Verluste der Wirbelströme sowie Hystereseeffekte. Die Wärmeenergie wird bis hin zu der Oberflächenschicht gestaut, wodurch zusätzlich eine Selbstinduktion entsteht. Dabei kommt es zur Überlagerung der Wirbelströme, weshalb für die Stromfäden ein höherer Widerstand entsteht. Dieser wirkt sich folglich in Form von Wärme aus. [8]

Die Erwärmung der Kohlenstofffasern wird durch das gleiche Prinzip realisiert. Jedoch entsteht die Erwärmung aufgrund anderer Wirkmechanismen. Die Sekundärspule wird durch ein elektrisch leitfähiges Kohlefaserbauteil ersetzt, dem Wirbelströme induziert werden. Durch die unterschiedliche Lagenanordnung bilden sich Leiterschleifen, wie in Abbildung 10 zu sehen.

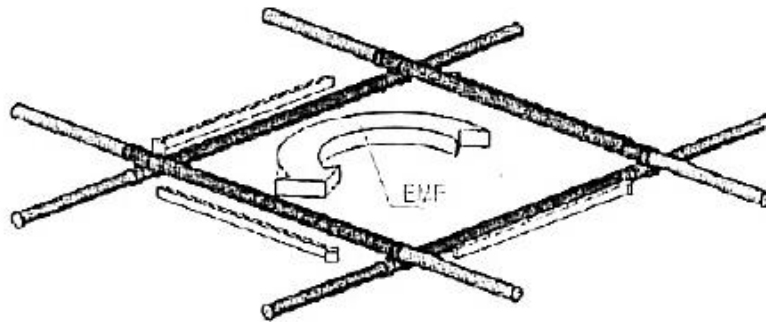


Abbildung 10: Induzierter Wirbelstrom in eine Leiterschleife [33]

Aufgrund des ohmschen Widerstandes erwärmen sich die Fasern beim Durchfließen des elektrischen Stroms. Das elektromagnetische Feld breitet sich dabei räumlich aus und regt alle Leiterschleifen in diesem Feld an. Die Induktionsparameter wirken bestimmend in Bezug auf die Ausbreitung und Wirtiefe des Feldes. [8] [33]

Aufgrund des hohen Wirkungsgrades der elektromagnetischen Erwärmung ergeben sich mehrere Vorteile. Da das zu erwärmende Werkstück in sehr kurzer Zeit erhitzt werden kann, kann das Verfahren einer drastischen Verkürzung der Zykluszeiten beitragen. Vor allem die kostenbewusste Fertigung hochkomplexer Teile kann dadurch besser realisiert werden. Darüber hinaus erfolgt die Erwärmung punktuell und ist sehr gut einstellbar, was



zur Folge hat, dass die Umgebung nur indirekt und schwach miterwärmt wird. Grundsätzlich wird dieses Prinzip sowohl in der Industrie als auch im privaten Bereich eingesetzt. U.a. dient die Induktion im Bereich der Kunststofftechnik der Werkzeugtemperierung von Spritzgussmaschinen. Eine der wohl geläufigsten Anwendungen im privaten Bereich ist in den Induktionskochfeldern zu finden. [18]

## 2.3 Grundlagen der Faserverbundtechnologien

Die im Rahmen dieser Arbeit zum Verkleben verwendeten Bauteile bestehen ausschließlich aus CFK. Nachfolgend wird ein kleiner Überblick in die Grundlagen der Faserverbundtechnologien gegeben. Das Unterkapitel 2.3 erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Da die zu verklebenden Bauteile ausschließlich aus CFK bestehen soll im Folgenden mit den Grundlagen der Faserverbundtechnologien ein kleiner Einblick in die Fertigung dieser geschaffen werden.

### 2.3.1 Preformtechnologie

Die Anforderungen an die Fertigungstechnologie für Faserverbundbauteile sind vielfältig und anspruchsvoll. Maßgebend für die Herstellung sind die geforderten Stückzahlen, der Verbundaufbau sowie die Komplexität des Bauteils. Einhergehend damit werden die eingesetzten Halbzeuge sowie die Qualität der Bauteile bestimmt. Diese sind aufgrund der Bauteilanforderungen auf einen für sie angepassten Herstellungsprozess angewiesen. Um diese Anforderungen realisieren zu können wurden im Laufe der Zeit mehrere Verfahren entwickelt und etabliert. Abbildung 11 soll einen allgemeinen Überblick der derzeit gängigsten Herstellungsverfahren geben und geht zusätzlich auf die Designfreiheit und den Automatisierungsgrad ein. [22] [23]

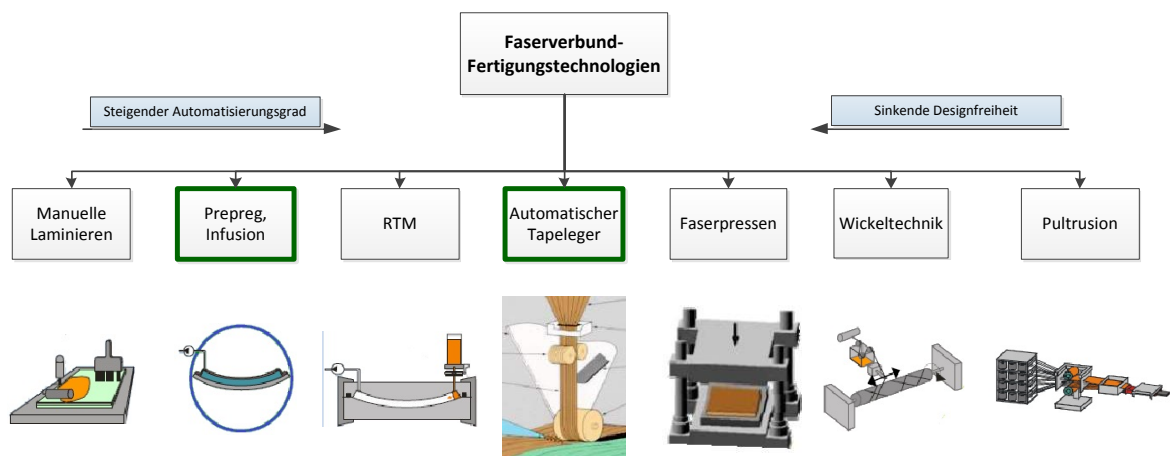


Abbildung 11 Herstellungsverfahren Faserverbund [22] [23]

Die Fertigungsverfahren können zusätzlich nach der Art der Matrixwerkstoffe sowie der Art der Faser/Matrix Zusammenführung differenziert werden. Dabei wird sowohl zwischen dem Thermoplast- und Duroplastverfahren als auch zwischen der Nass- und Prepregtechnik unterschieden. Weiterhin ist das Infusionsverfahren zu erwähnen. Bei der sog. Nasstechnik werden trockene Faserhalbzeuge mit Harz benetzt, wie beim Handlaminieren oder dem Wickelprozess. Das Infusionsverfahren bedient sich ebenfalls des trockenen Faserhalbzeuges, welches vorerst zu einem Preform zusammengefügt wird. Anschließend wird das Fasermaterial benetzt, indem das Matrixharz durch Vakuum in ein geschlossenes Metallwerkzeug oder unter eine Vakuumfolie gezogen wird. Nachfolgend wird, aufgrund des Schwerpunktes des Herstellungsprozesses in dieser Arbeit, näher auf die Prepregtechnik eingegangen.

Prepreg-Materialien werden vorwiegend für die Herstellung hochbeanspruchter Bauteile verwendet, da es durch ihre hohe Reproduzierbarkeit und die Qualität besonders für die Fertigung geeignet ist. Prepregs (engl.: PREimPRAGnated) sind ebene, mit Harz vorimprägnierte Halbzeuge. Bei der Verwendung von hochtemperaturbeständigen Harzsystemen bilden sich hochviskose und giftige Reaktionsmassen, die entweder mit hohen Temperaturen oder mit Lösungsmitteln verarbeitet werden müssen, um die gewünschten Imprägnier- und Bearbeitungseigenschaften zu erreichen. Für die Herstellung von Prepreg wurden in Abhängigkeit von der Matrix zwei kontinuierliche Verfahren entwickelt. Dabei handelt es sich um die Schmelzimprägnierung und die Lösungsmittelimprägnierung. Die folgende Abbildung 12 dient der bildlichen Veranschaulichung eines der beiden genannten Herstellungsmethoden.

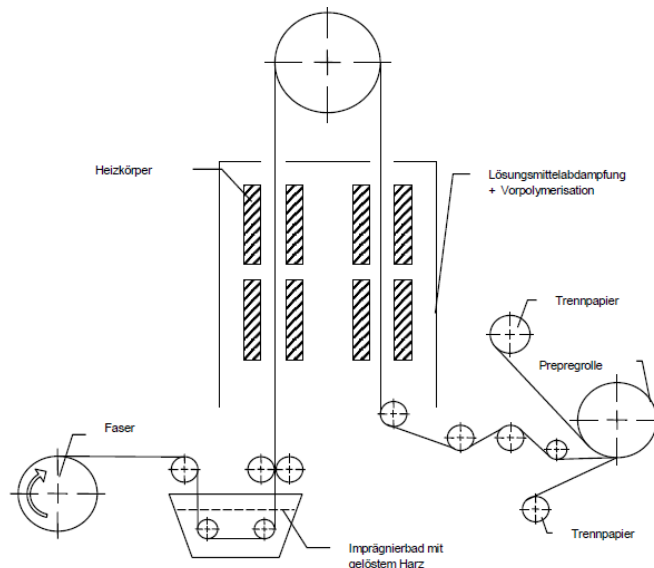


Abbildung 12: schematische Darstellung Lösungsmittelimprägnierung [23]

Die Fasern bei der Schmelzimprägnierung werden durch ein sogenanntes Rakelsystem beschichtet. Aus einem mit Harz gefüllten und erhitzten Depot fließt das Harz auf die Fasern und benetzt diese. Die gleichmäßige Dosierung und Verteilung wird hierbei durch einen Rakel bzw. der Abzieher realisiert. Für eine optimale Imprägnierung bedarf es be-

stimmter Viskositätseigenschaften, die die Schmelzharze jedoch ohne den Zusatz jeglicher Lösungsmittel erreichen.

Bei der Lösungsmittelimprägnierung werden die Fasern in einer Harzmischung aus Harz, Härter und Lösungsmitteln getränkt. In dem nachgeschalteten Ofen verdampft das Lösungsmittel und eine homogene Harzmatrix entsteht. Das Material wird aufgrund der geringen Temperaturen nicht geschädigt.

Anschließend wird in beiden Prozessen das benetzte Fasermaterial mit Trennpapier aufgerollt. Um die Reaktion und Aushärtung des Harzes zu unterbinden muss das Prepreg-Material ständig gekühlt werden, wodurch sich die Lagerung sehr umständlich gestaltet.

[\[23\]](#)

Die Herstellung von Bauteilen aus Prepreg-Material erfolgt in der Regel automatisiert durch eine Fiberplacement-Anlage. Rechnergesteuerte Roboter legen dabei Prepregstreifen, sogenannte tows, auf dem Werkzeug ab. Die im Laufe dieser Arbeit verwendete manuelle Bauteilfertigung und Drapierung, ist parallel eine Variante zur Automatisierung. Die Aushärtung von aus Prepreg gefertigten Bauteilen erfolgt im Autoklaven. Dabei härtet das Harz vollständig aus und die Lösungsmittel verdampfen.

### 2.3.2 Bauteilaushärtung

Die Aushärtung von Prepreg-Bauteilen erfolgt in einem Autoklaven, einem gasdicht verschließbaren Druckofen. Dieser dient der thermischen Behandlung von Bauteilen und findet unter anderem in der Luft- und Raumfahrt, der Medizintechnik, der Biologie und Lebensmittelindustrie sowie in vielen weiteren Bereichen Verwendung. Autoklaven sind zu einem unverzichtbaren Werkzeug für die Herstellung hochqualitativer Faserverbund-Struktur-Bauteile in der Luft- und Raumfahrt geworden. Aufgrund ihrer Größe ermöglichen sie es, große Flugzeugsegmente wie Flügel und Rümpfe zu produzieren. Sie können eine Vielzahl von Faserverbund-Materialien sowohl auf duroplastischer als auch auf thermoplastischer Basis herstellen.

Die Autoklavprozesse zeichnen sich durch die Einwirkung von Druck, Temperatur und Vakuum aus und ermöglichen somit die Herstellung hochwertiger Strukturbauteile. Je nach gewähltem Harz- und Klebstoffsystem kommen dabei Temperaturen bis zu 300°C sowie Drücke bis zu 20 bar zustande. Vor dem Autoklavprozess werden die Bauteile zusätzlich evakuiert um so die Qualität gewährleisten zu können. Ein typischer Vakuumaufbau, wie er u.a. in einem Autoklav zum Einsatz für Faserverbundbauteile kommt, ist in folgender Abbildung 13 abgebildet.

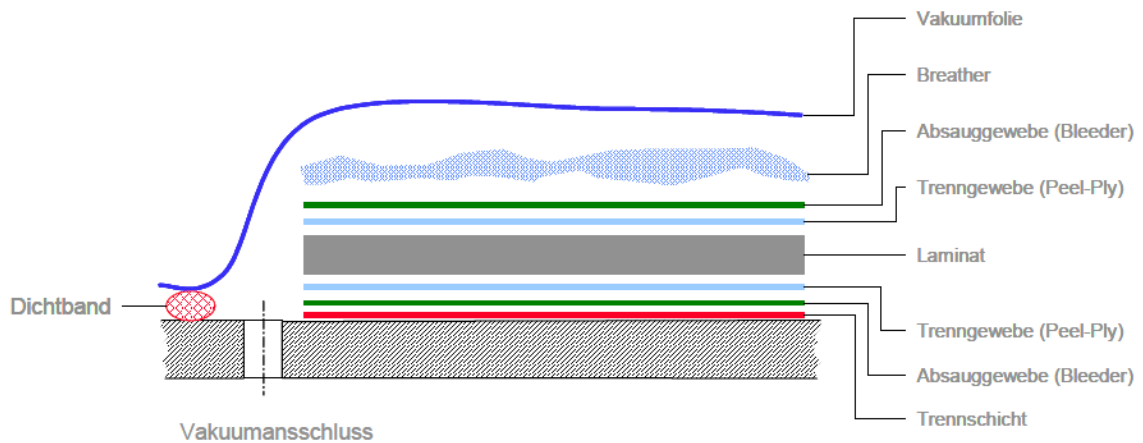


Abbildung 13: Vakuumaufbau Autoklavprozess [23]

Dieser mehrschichtige Aufbau wird angewendet, um das Prepreg-Material sowie miteinander verklebte Bauteile zusätzlich zu kompaktieren, das Harz gleichmäßig zu verteilen und überschüssiges Harz aufzusaugen. Ferner sind die Druck-, Vakuum- und Temperatureinstellungen von enormer Bedeutung.

Dabei wirkt die Temperatur bestimmend in Bezug auf die Fließeigenschaften des Harzes und leitet dessen Aushärtungsreaktion ein. Temperaturverlauf sowie -verteilung sind dabei qualitätsbestimmend, da sich die Dichte mit der Temperatur ändert und zur ungleichmäßigen Aushärtung führen kann. Dies kann wiederum bauteilschädigende Eigenspannungen zur Folge haben. Gleicherweise können Eigenspannungen durch ungleichmäßig verteilten Druck und Dickenunterschieden hervorgerufen werden. Der Vakuumaufbau als auch der Innendruck des Autoklaven gewährleisten einen optimalen Harzfluss und die Verdichtung des Laminats. Der Autoklavprozess ermöglicht es somit, hochwertige Strukturbauteile mit einem Faservolumengehalt von über 50% zu fertigen. Ein typischer Zyklus für duroplastische Harzsysteme ist in Abbildung 14 abgebildet.

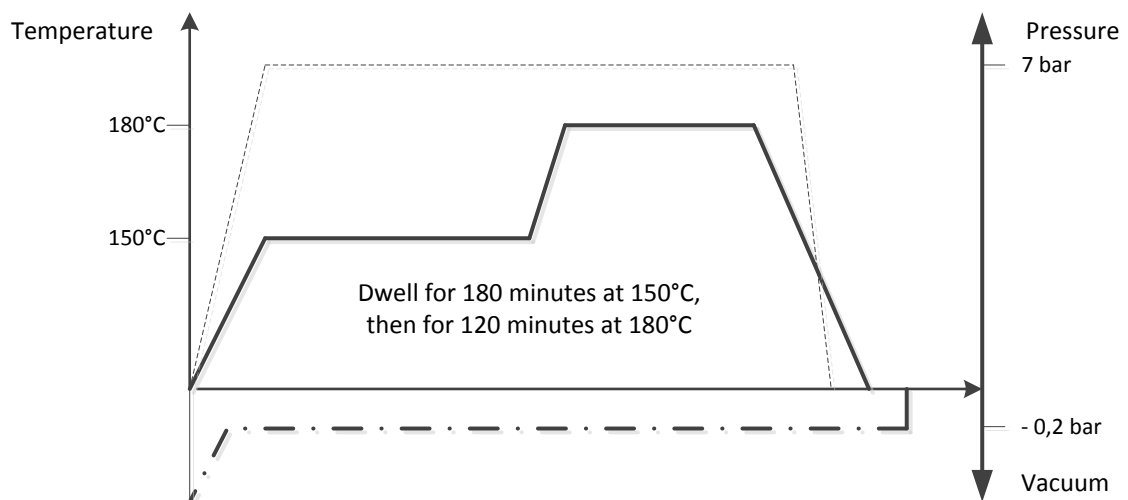


Abbildung 14: Typischer Autoklavzyklus [24]



## 2.4 Zusammenfassung

In einer Industrie, in der ständig höhere Erträge mit weniger Aufwand gefordert werden, spielen neuartige Technologien und Effizienz eine immer wichtigere Rolle. Zusammenfassend betrachtet, haben die vorgestellten Technologien die Möglichkeit diese Rolle einzunehmen und das Potential der Faserverbundwerkstoffe auszuschöpfen.

Die Prepreg-Technologie sowie das Fiberplacement-Verfahren sind diesbezüglich sehr vielversprechend, da sie ein optimales Verhältnis von Werkstoffsteifigkeit, spezifischem Gewicht und komplexer geometrischer Gestaltung realisieren und somit eine ökonomische Ausnutzung der statischen und dynamischen Festigkeitseigenschaften erreichen können.

Der anschließende Aushärtezyklus im Autoklaven gewährleistet die Fertigung eines hochwertigen Strukturbauteils, welches anderweitig nicht umsetzbar wäre.

Durch das Verkleben profitieren die Bauteile zusätzlich in Form erhöhter Steifigkeit und gleichmäßigerer Belastung. Vor allem die Verklebung mittels Induktion ermöglicht dabei eine enorme Prozesszeitverkürzung.

Primär die Möglichkeit zur Prozessautomatisierung spielt bei dieser Fertigungsreihe eine entscheidende Rolle. Durch den Einsatz von Robotern können Ablege- und Klebprozesse vollständig automatisiert werden, kleinere Toleranzen eingehalten werden und Prozesszeiten verkürzt werden.

Letztendlich bieten alle genannten Technologien sowohl Vor- als auch Nachteile, die es in Bezug auf konstruktive und wirtschaftliche Hintergründe abzuwägen gilt. [\[14\]](#)

### 3 Stand der Technik

Das Ziel dieser Arbeit liegt in der Prozesszeitverkürzung der Verklebung von flugzeugversteifenden Segmenten. Nach den theoretischen Grundlagen soll in den folgenden Unterkapiteln die aktuelle Fertigungskette dieser betrachtet und auf die einzelnen Fertigungsabschnitte eingegangen werden. Diese sollen das Verbesserungspotential der aktuellen Fertigung analysieren und die Grundlage für die spätere Diskussion bilden.

#### 3.1 Fertigungskette von versteiften Flugzeugsegmenten aus CFK

In der Abbildung 15 wird der aktuelle Fertigungsablauf von versteiften Flugzeugsegmenten aus CFK detailliert dargestellt. Das Ziel dabei ist es, zu veranschaulichen, welche Prozesse primär Teil dieser Arbeit sind.

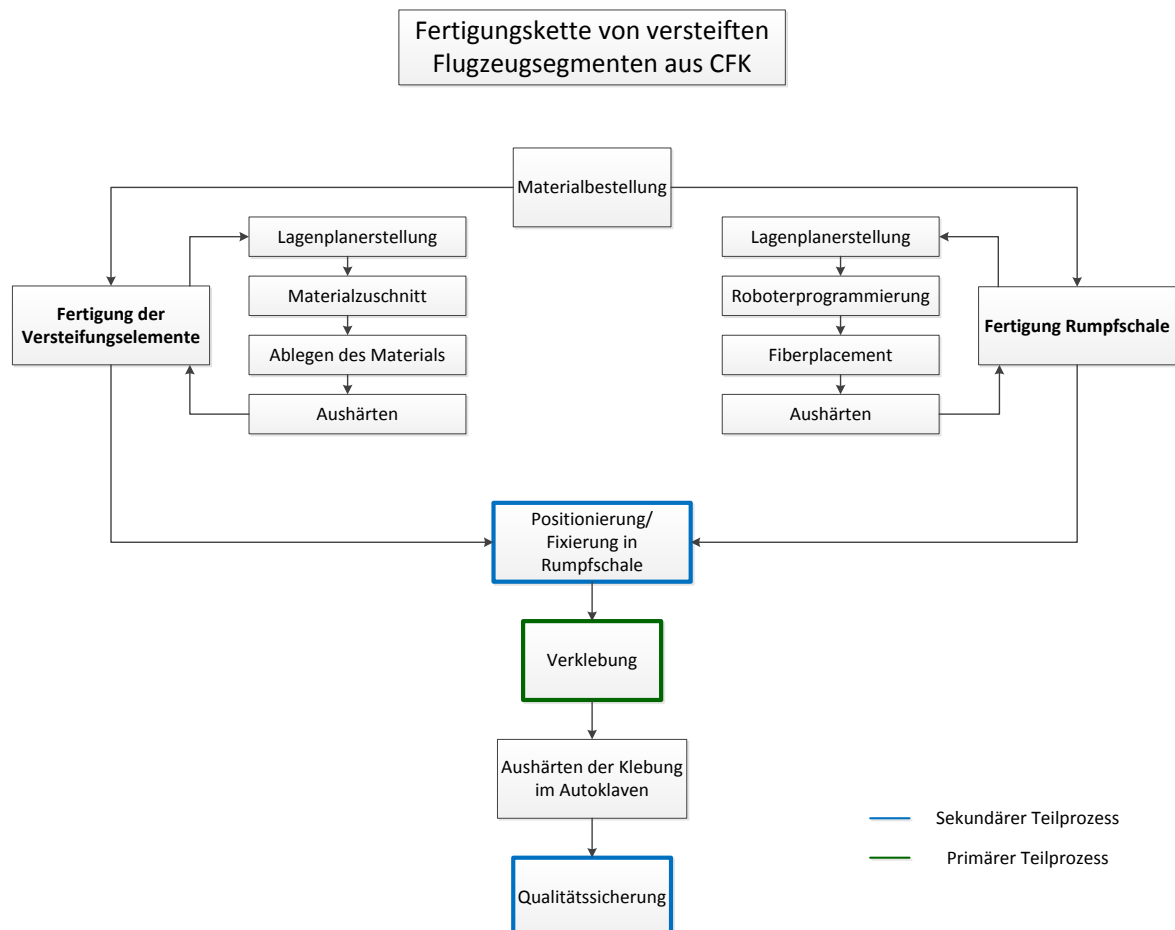


Abbildung 15: Fertigungskette versteifter Flugzeugsegmente [5] [23]

Die „Verklebung“ stellt den Teilprozess dar, der primär zu der Prozesszeitverkürzung führen soll. Die Abschnitte „Positionierung/ Fixierung“ sowie „Qualitätssicherung“ stellen dar-

über hinaus die Teilprozesse dar, die zielführend für die Verklebung der Versteifungselemente verantwortlich sind.

In den folgenden Kapiteln wird nun auf den aktuellen Stand der Fertigung der betreffenden Teilprozesse eingegangen.

### 3.2 Positionierung und Fixierung von Versteifungselementen

Bislang bestehen Flugzeugrümpfe und deren Versteifungselemente meist aus Aluminium. Durch eine Fräsmaschine werden vor der Montage Bohrungen in der Rumpfschale gesetzt, nach denen sich die Versteifungselemente positionieren lassen.

Durch die Entwicklung des innovativen Leichtbaus werden die Rumpfschalen und Versteifungselemente durch Bauteile aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff ersetzt. Da diese neuartigen Bauteile nicht grundlegend mit den alten Fertigungsverfahren bearbeitet werden können, bedarf es neuer Fertigungsansätze. Wie bereits in Kapitel [1.1](#) beschrieben besteht die Möglichkeit den Prozess durch weiterführende Verfahren zu optimieren. Für die Positionierung der Versteifungselemente jedoch fällt somit ein wichtiger Montageschritt weg, den es zu kompensieren gilt. Der Einsatz der Klebtechnik, bei welchem die Versteifungselemente in der Außenhaut verklebt werden, kann die Positionsfindung nicht unterstützen.

Der Fertigungsschritt der Positionierung der Elemente wird, wie in nachstehender Abbildung gezeigt, je nach Unternehmen und Forschungsstand unterschiedlich umgesetzt. Auf die angeführten Möglichkeiten soll folglich eingegangen werden.

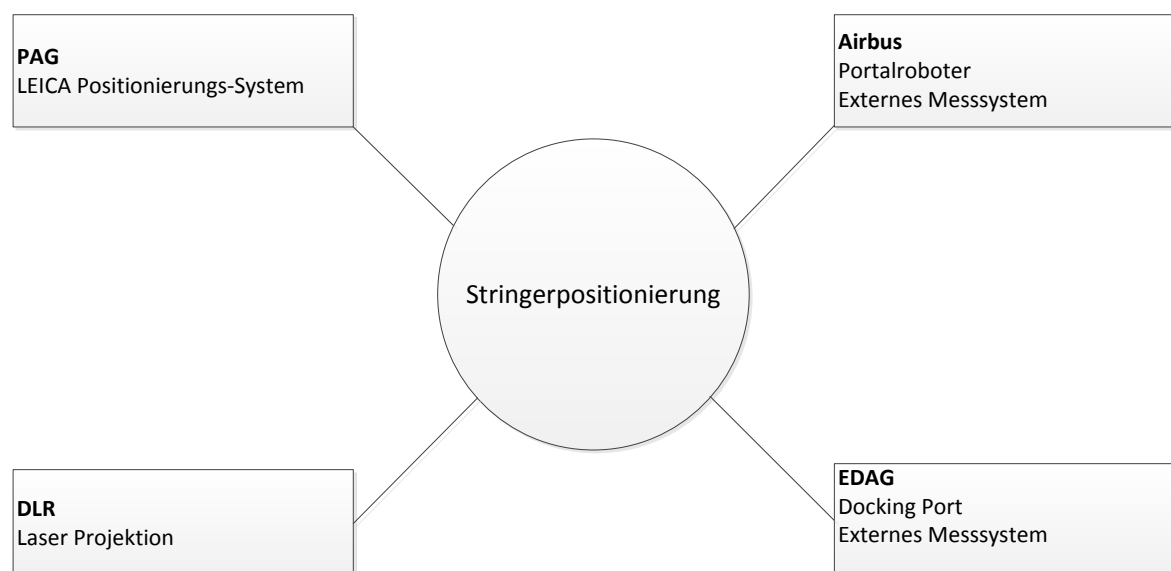


Abbildung 16: Positionierungssysteme [\[25\]](#) [\[26\]](#) [\[28\]](#)

Da eine manuelle Montage per Hand zu unwirtschaftlich wäre, besteht das Ziel darin die Stringerelemente computergesteuert durch Roboter zu platzieren. Laut der *Premium Ae-*



*rotec GmbH (PAG)* sollen bis zu 13 Flugzeuge mit CFK-Bauteilen pro Monat gebaut werden, was sich lediglich durch den automatisierten Einsatz von Robotern realisieren lässt. Bei der Montage dürfen die Toleranzen  $\pm 0,3\text{mm}$  nicht übersteigen. Da die Roboter durch die hier geforderten Toleranzangaben an ihre Grenzen gebracht werden bedarf es einer speziellen Messtechnik. Ein 6D Kamera-Messsystem überwacht und steuert die Roboterfahrten und gewährleistet somit eine Positionierung innerhalb der Toleranzangaben. Wie in der folgenden Abbildung 17 zu sehen ist, werden pro Stringer zwei Roboter benötigt, die den Stringer ansetzen, ausrichten und zum Fixieren und Verkleben andrücken. Bis zu dem Schritt der vollständig robotergesteuerten Montage wurden die Roboter lediglich zur Positionierung, nicht aber zur Fixierung verwendet. Die Stringer mussten bis zu diesem Schritt per Hand in der Schale mittels Tape fixiert werden. [25] [12]

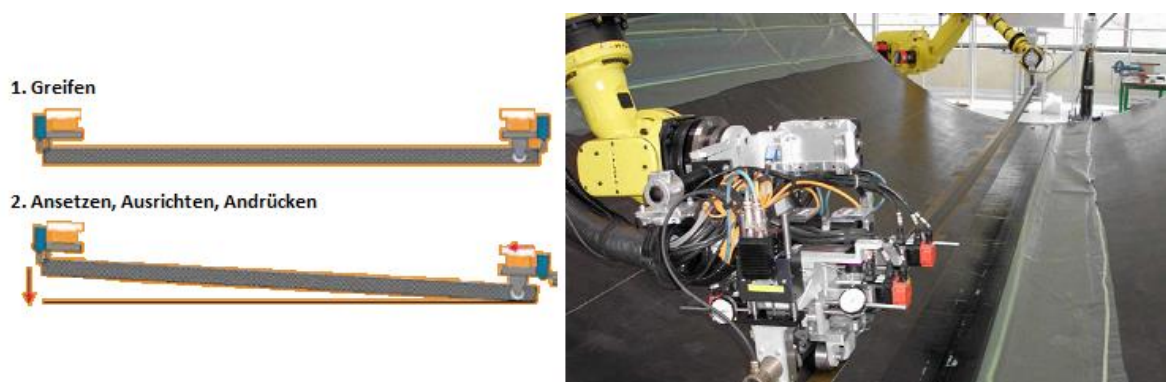


Abbildung 17: Stringerpositionierung [25]

In Zusammenarbeit mit PAG fungiert die *FFT EDAG Produktionssysteme GmbH Co. KG*, die sich weitreichend mit dieser Problematik auseinander setzt. Dabei wurde eine Aufnahmeeinrichtung für das automatische Aufnehmen und Absetzen von Stringerelementen entwickelt, die sich beliebig auf Robotersysteme adaptieren lässt. Darüber hinaus wurde ein Greifer in das Werkzeug integriert, dem es ermöglicht, die Stringerelemente in jeder Position zu halten und zu positionieren. Über Führungsrollen können beliebige Profilformen, im speziellen aber Omega-Stringer, aufgenommen werden. Eine weitere wichtige Vorrichtung ermöglicht es dem Werkzeug den Profilkörper auf das zu fügende Bauteil zu drücken um eine dauerhafte Verbindung herstellen zu können. Bei dieser optionalen Vorrichtung zum Aktivieren der Verbindung handelt es sich um die Zufuhr von Wärme, Strahlung oder Druck. Im Nachstehenden ist ein solches Werkzeug im Querschnitt abgebildet und zeigt die wichtigsten Bauteile auf, die für die genannten Funktionen notwendig sind.

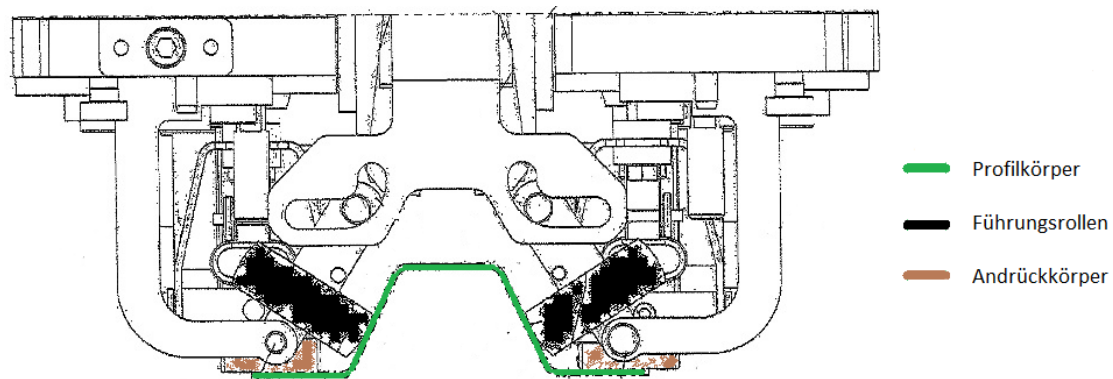


Abbildung 18: Aufnahme Werkzeug nach FFT EDAG [26]

Für eine verbesserte Positions- und Messgenauigkeit des Roboters setzt *EDAG* verschiedene Messsysteme ein. So ist es möglich, das Werkzeug mit einem 6D Kraftsensor auszurüsten, der bevorzugt an der Schnittstelle zwischen Roboter und Werkzeug verbunden wird. Der Kraftsensor besteht aus einem monolithischen Messkörper, der die Verformung im Mikrometerbereich erfassen kann. Weiterhin führt die Integration eines externen Messsystems zur Verbesserung der Genauigkeit. Durch Sensoren am Roboter oder dem Werkzeug selbst, kann die Ist-Position erfasst und detektiert werden. Diese wird dann kontinuierlich mit der Soll-Position verglichen. Bei dem externen Messsystem besteht die Alternative zwischen einem iGPS System, einem Lasertracker-System oder einem kamerateilgestütztem Trackingsystem (siehe Abbildung 15). [26]

*AIRBUS* nutzt ein ähnliches Verfahren zur Positionierung von Stringern auf einer Flugzeughaut. Bisher wurde mittels einer Laseroptik ein Orientierungsmuster auf dem Werkzeug bzw. der zu fügenden Rumpfschale projiziert. Die Stringer wurden mit einem Klebefilm, der die dauerhafte Verbindung zwischen Stringer und Schale herstellt, versehen, anhand dieses Musters platziert und mit Andrückgewichten fixiert. Bei dieser Art der Positionierung konnte eine Genauigkeit von  $\pm 3$  mm erreicht werden. Eine darauffolgende Feinpositionierung wurde mithilfe mehrerer Klemmschablonen, die äquidistant in Längsrichtung der Flügelschale an Passbohrungen eingesteckt und referenziert werden, realisiert. Durch die zeitlichen Zielvorgaben, den manuellen Arbeitsaufwand und die geringe Genauigkeit bei dem Aufbau bestehen schwerwiegende Nachteile.

Demgegenüber hat die *AIRBUS Operations GmbH* die Aufgabe erfindungsgemäß durch eine Anlage mit einem Portalroboter gelöst. In dem Portalroboter ist ein Greiferbalken integriert, der mit einer Bereitstellungseinheit und einer Aufheizstation zusammenwirkt. Der Greiferbalken ist so ausgelegt, dass er zum Aufgreifen und punktgenauen Absetzen von Stringern dient und sich darüber hinaus an die örtliche Form der Innenfläche einer Flügelhaut anpassen kann. Die Aufheizstation wird mit mehreren Infrarotstrahler-Modulen betrieben, die im kurzwelligen Infrarotbereich arbeiten und höchste Energieabstrahlung auf geringstem Raum erreichen. Trotz dessen, dass das System mittels numerischer Prozesssimulation steuerbar ist ergibt sich infolge der weitläufigen Führungsschienen eine Ungenauigkeit von ca. 2 mm. Um diese zu vermeiden wurde ein absolutes Wegmesssystem verwendet, bei dem eine Rückkopplung zwischen IST- und SOLL-Position erfolgt.

AIRBUS stellt mit diesem Montageverfahren sicher, dass sich beim Zusammenbau der Flügelschalen mit den betreffenden Holmen und Rippen eine hinreichende Passgenauigkeit ergibt und die Positionen mit den Bauunterlagen übereinstimmen. [27]  
Die nachfolgende Abbildung 19 zeigt das bei AIRBUS eingesetzte Portalrobotersystem.

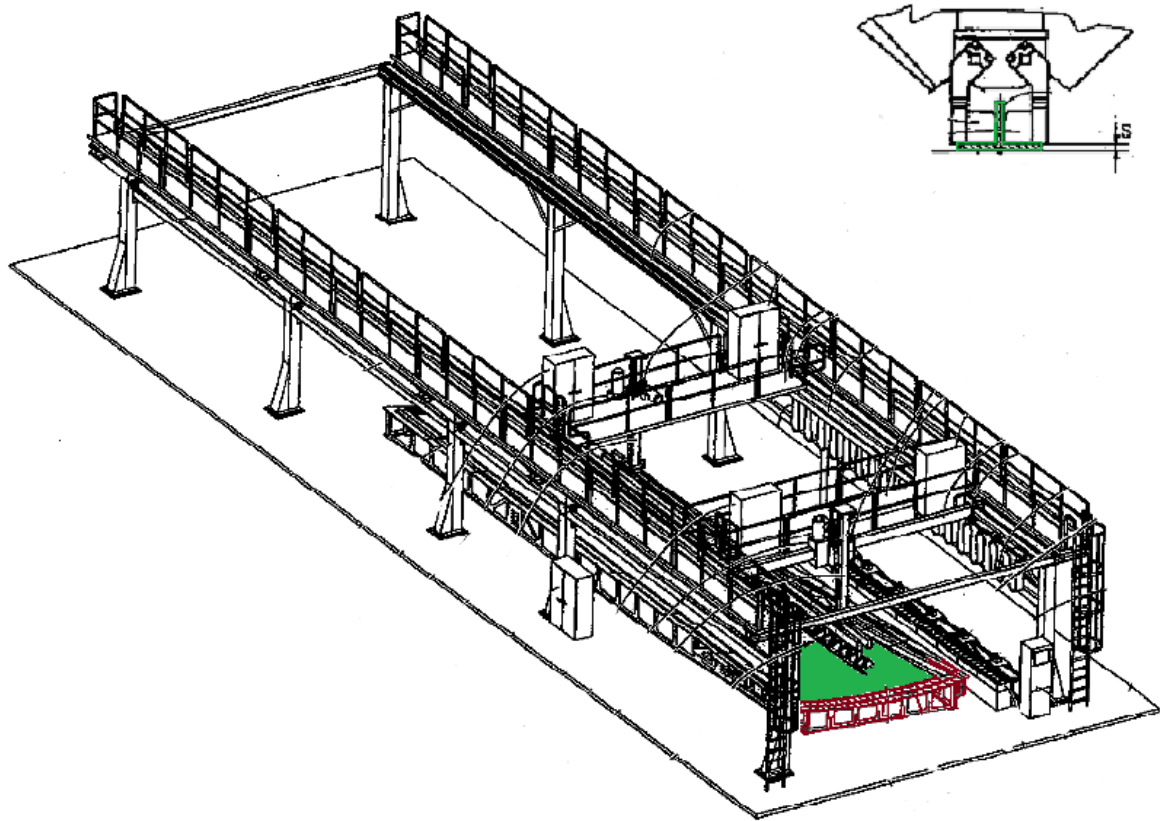


Abbildung 19: Stringerpositionierung Airbus [26]

Am „Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.“ wird die Problematik in einem anderen Maßstab verfolgt und entwickelt. Im Vordergrund liegt dabei die Grundlagenforschung und Prototypenentwicklung, sodass sich die Verwendung und Entwicklung eines robotergestützten Systems für Serienprozesse als unwirtschaftlich herausstellen würde. Um den Positionierungsprozess im Vergleich zum manuellen Positionieren genauer zu gestalten, wird am DLR ebenfalls mit einer Laserprojektionsanlage gearbeitet. Die Position der Profile wird dabei Anhand eines CAD-Modells auf die Werkzeugoberfläche projiziert. Als Referenz für die Anlagen dienen festinstallierte sogenannte Targets. Lediglich das Aufbringen der Stringer auf das Werkzeug, wie in nachfolgender Abbildung 20 zu sehen, wird per Hand durchgeführt.

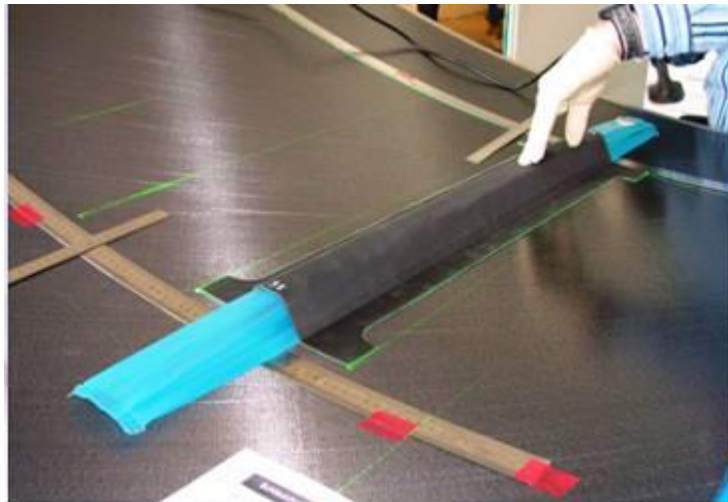


Abbildung 20: Stringerpositionierung DLR [28]

Um die Stringer nach der Positionierung bis hin zum Wärmeeintrag zu fixieren, werden Magnete benutzt. Die Verbindung der beiden Bauteile wird durch den Wärmeeintrag mittels eines konventionellen Heizgerätes realisiert. Um schließlich eine hohe kontinuierliche Druckkraft auf die Klebefläche aufzubringen, werden die Stringer vor dem Autoklavprozess unter einem Vakuumaufbau evakuiert. [28]

### 3.3 Verklebung von Versteifungssegmenten

Zu dem Klebeverfahren bei *AIRBUS* stehen keine öffentlich zugänglichen Informationen zur Verfügung. Die folgenden Angaben sind lediglich durch eigene Betrachtungen bei einem Werksbesuch bei *AIRBUS* Stade entstanden. Aus diesem Grund wird keinerlei Gewähr auf die Richtigkeit der Angaben übernommen.

Die Verklebung der Versteifungselemente wird derzeit zum großen Teil per Hand realisiert. Die Stringer werden mit Abreißgewebe angeliefert, welches bei der Fertigung verwendet wird um eine raue Oberfläche zu erhalten. Nach der Anlieferung wird das Gewebe entfernt und die Stringer werden in eine Vorrichtung aus ca. 10 Säulen, die in ihrer Anordnung nach der Form der Stringer ausgerichtet sind, eingespannt.

Daraufhin wird der Folienkleber aufgebracht und mit Heizmatten erwärmt. Diese sind einen Meter lang und werden der Länge nach auf die Stringer gelegt. Der Stringer ist dabei mit seiner Klebfläche nach oben ausgerichtet. Die Heizmatte wird von zwei Mitarbeitern nach jedem Heizvorgang angehoben und weiterbewegt. Der Heizvorgang dauert jeweils eine Minute.

Nachdem der Klebefilm auf den Stringerelementen aufgebracht ist, werden sie in der Rumpfschale von Hand positioniert. Die Positionierung wird mittels einer Laserprojektion vorgenommen. Die Validierung der Positionen werden sowohl mit einem Lasertracker als auch mit einem Taster durchgeführt.

*AIRBUS* härtet den Klebefilm in diesem Stadium des Prozesses durch Wärmeeintrag bereits ansatzweise aus. Dafür wurde eine Vorrichtung zum Erhitzen entwickelt, die aus

zwei Magneten und einer Heizfläche besteht. Folglich wird das Gerät auf den Stringer aufgelegt und durch die Magnete fixiert, sodass ein Kraftschluss zwischen Stringer und Werkzeug entsteht. Daraufhin startet erneut ein Heizvorgang über eine Dauer von einer Minute. Zur vollständigen Verklebung folgt im Anschluss der Autoklavzyklus. Die Stringer durchlaufen diesen Prozessabschnitt ohne weitere Fixierung und werden lediglich durch ihre Vorverklebung und dem Vakuumaufbau gehalten.

Für zukünftige Serienproduktionen ist geplant, alle vorbereiteten Stringer in eine große Vorrichtung einzusetzen. Diese bildet in etwa die Positivform der Rumpfschale nach und wird nach der Platzierung der Stringerelemente von oben in die Negativform verfahren. Somit ist geplant, alle Stringer simultan ihrer vorgegebenen Position in der Rumpfschale zu fügen. [\[46\]](#) [\[47\]](#)

Die *FFT Produktionssysteme GmbH & Co. KG* hat sich über die Positionierung hinaus auch mit der Verklebung der Versteifungselemente auseinander gesetzt. Die Vorverklebung realisiert *FFT* mit dem in Abbildung 18 dargestellten Greifer.

Diesem ist ein Infrarotsystem implementiert, welches durch Wärmestrahlung die zu verklebenden Bauteile erhitzt. Dafür wird eine Andrückeinrichtung mittels der Infrarotstrahlung erhitzt. Diese leitet die Wärmeenergie auf die Oberfläche der CFK Bauteile weiter und übt einen Anpressdruck auf die Bauteile aus. Für diesen Vorgang wird ca. eine halbe Minute benötigt. [\[21\]](#)

### 3.4 Einsatz der Induktionstechnologie in der Industrie

Für die Verklebung zweier Materialien mit einer wärmeaktivierbaren Klebeschicht sind bereits mehrere Entwicklungsansätze bekannt. Die thermische Aktivierung mittels Induktion brachte bereits mehrere Patente hervor.

Die *AIRBUS Deutschland GmbH* hat ein Verfahren für den Flugzeugbau entwickelt, bei dem zwei Bauteile mittels einer durch wärmeaktivierbaren Klebeschicht verbunden werden. Die Klebeschicht soll durch Induktion thermisch aktiviert werden und somit die Bauteile miteinander verbinden.

Im Flugzeugbau werden häufig Materialien, wie beispielsweise thermoplastische Kunststoffe und Faserverbundmaterialien miteinander verbunden. Diese Verbindungen werden meist durch mechanische Befestigungen, insbesondere durch Schrauben, oder durch Kleben verbunden. Beispielsweise werden Kunststoffhalter oder Versteifungselemente mit Faserverbund-Bauteilen verbunden. Das Kleben dieser Materialien erfordert eine sehr aufwendige Vorbehandlung der Klebeflächen und stellt zudem einen zeitaufwendigen Fertigungsprozess dar. Alternativ werden Kunststoffhalter mittels Schrauben an den Faserverbund-Bauteilen befestigt, was sich allerdings nachteilig auf den gesamten Herstellungsprozess auswirkt. Der vorliegenden Erfindung liegt diese Problematik zu Grunde und soll mit der Umsetzung eines weniger aufwendigen und zeitintensiven Verfahrens gelöst werden. Die Aktivierung des Klebematerials erfolgt nun durch die Einbringung von Induktionswärme. Dafür werden Materialien und/oder Klebematerialien mit induktionswärmeer-



zeugenden Bestandteilen, wie bspw. metallischen Nanopartikeln oder Nanoferriten, bevorzugt. Da die Erzeugung der Induktionswärme und die damit verbundene Aktivierung des Klebematerials sehr schnell erfolgen, kann die Prozesszeit im Vergleich zu anderen im Flugzeugbau bekannten Verfahren sehr stark reduziert werden. Mit Verwendung der Klebverbindung sind weiterhin keine Bohrungen in den Materialien erforderlich, wodurch eine Veränderung der Verbindungsposition eines Bauteils relativ vereinfacht und eine Materialschwächung unterbunden wird. Die durch mittelfrequente (10kHz bis 50kHz) Strahlung erzeugte Induktionswärme wird bevorzugt angewendet, da die Induktionsgeräte selbst und die Vorrichtungen dafür kleiner und handlicher sind. Der Prozess kann somit weiterhin vereinfacht werden.

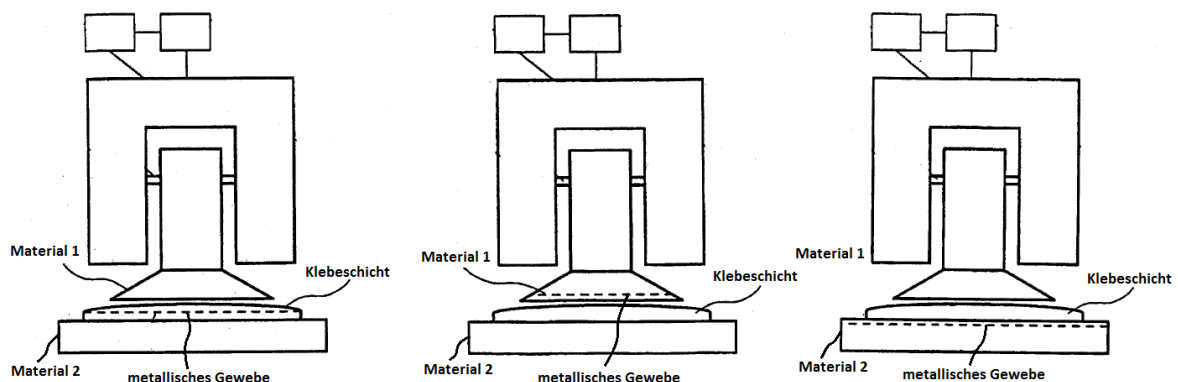


Abbildung 21: Prozess mit induktionswärmeerzeugenden Materialien [29]

In der Abbildung 21 ist der Prozess mit einem sogenannten induktionswärmeerzeugendem Material, hier ein nichtgewebtes metallisches Netz, dargestellt. Das metallische Netz kann sich in einem der beiden Bauteile, oder in der Klebeschicht selbst, jedoch immer in der Nähe des Verbindungsbereichs befinden. Der Prozess kann für vielerlei Materialkombinationen angewendet werden, ist aber vor allem für das Kleben zweier Faserverbund-Bauteile interessant. Für den Verbund von Kohlenstofffasern sind diesbezüglich auch keinerlei induktionswärmeerzeugende Materialien notwendig. [29]

In einem weiteren Patent, welches durch die *AIRBUS Operations GmbH* angemeldet wurde, geht es um das Aushärten eines Kunststoffmaterials durch den Wärmeeintrag mittels Induktion. Die vorliegende Erfindung schafft dabei ein Verfahren zum Zusammenfügen zweier Bauteile, von denen mindestens eines einen faserverstärkten Kunststoffwerkstoff aufweist. Die Bauteile sollen durch ein unausgehärtetes Kunststofffüllmittel verbunden, und später durch Energiezufuhr in Form von Wärme, Ultraschall oder Induktion dauerhaft miteinander verbunden werden. Bei dem Füllmittel handelt es sich um ein flüssiges Fugenfüllmittel (liquid shim), in dem Nanopartikel dispergiert sind. Von außen wird gezielt Energie lokal in die Nanopartikel eingebracht, um das Kunststoffmaterial auszuhärten. Unter einem weiteren Gesichtspunkt schafft diese Erfindung, wie in folgender Abbildung gezeigt, eine Vorrichtung zum Zusammenfügen zweier Bauteile.

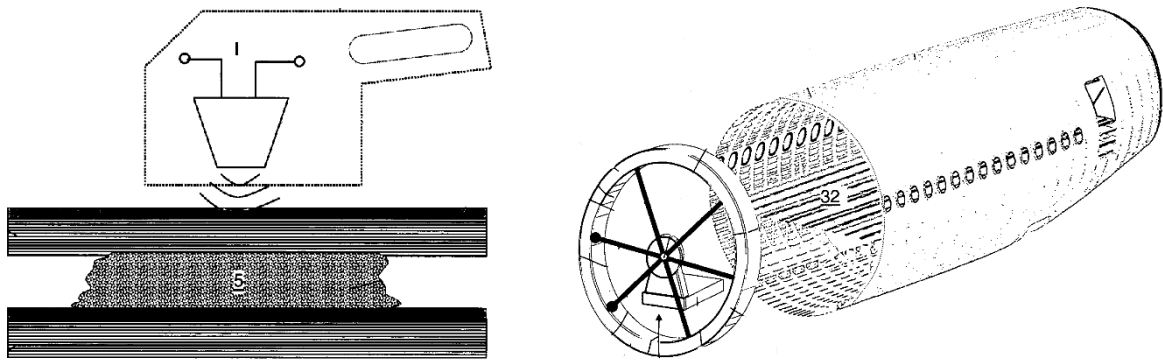


Abbildung 22: Wärmeeintrag in FV-Bauteil [30]

Die Energieeinbringeinrichtung (rechts im Bild) kann sogar als ringförmige Energiequelle eingesetzt werden. Drei aneinander schließende 120°-Segmente können alternativ als Quelle für Induktion, Mikrowellenstrahlung, Ultraschall, sichtbares und/oder infrarotes Licht, oder Energie in Form von transportierender Strahlung dienen. Die vorliegende Erfindung ist vorwiegend auf die zugrunde liegende Problematik in Bezug auf Rumpfschalenbauteile eines Flugzeugs erläutert, kann aber auch auf beliebige Bauteile angewendet werden. [30]

Das *Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern*, brachte ein Patent hervor, worin das Verbinden zweier Faserverbundbauteile mittels Induktionsschweißen beschrieben wird. Durch Schweißen miteinander verbundene Faserverbund-Werkstücke weisen bei einer Schweißverbindung nach dem Stand der Technik in der Fügezone eine Schwachstelle auf, da hier keine Faserverstärkung vorhanden ist. Erfindungsgemäß soll die Problematik mit einem alternativen Verfahren zur Verbindung zweier Faserverbund-Bauteile gelöst werden. Dazu wird der Fügeiteiloberfläche Matrixmaterial abgetragen, um einzelne Fasern freizulegen und diese mit dem verwendeten Zusatzmaterial zu verbinden. Durch die Verbindung ist eine relativ hohe Festigkeit in der Fügezone erreichbar. Bei der Kraftübertragung von einem Werkstück zu dem anderen wirken so stets die in dem Zusatzmaterial vorhandenen Fasern des einen Werkstückes mit. Weiterführend werden die Werkstücke gemeinsam mit dem Zusatzmaterial durch sämtliche bekannte Kunststoffschweißverfahren verschweißt. Insbesondere das Ultraschall-, Heizelement-, Laser-, Reib- oder Infrarotschweißen werden dafür verwendet. Sind die Fasern der Werkstücke leitfähig, zum Beispiel Kohlenstofffasern, kann das Aufschmelzen auch per Induktion erfolgen. [31]

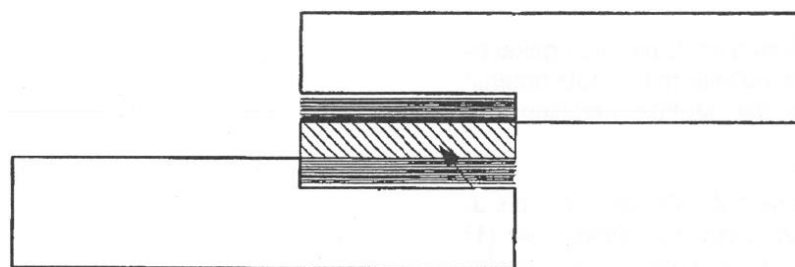


Abbildung 23: Faserverstärkte Klebung [31]

Die *Newfrey L.L.C.* benutzt die Induktionstechnologie zum Verkleben von Kleinteilen, insbesondere Bauelementen wie Haltebolzen, Verschlussstopfen, Befestigungselementen, Dübel und dergleichen. In die dafür verwendete Fügevorrichtung sind eine Induktionsspule zum Erwärmen der Klebezone und eine Haltevorrichtung integriert. Die Materialkombinationen bei diesem Prozess beziehen sich nicht zwangsläufig auf Kunststoffe und Faserverbund-Bauteile.

Darüber hinaus wird die Induktionstechnologie auch bei *The Boeing Company* eingesetzt. Hier gestaltet man den Superplastischen Umformprozess (SPF) mit dem Einbringen von Induktionswärme neu. Bei dieser Art von Umformprozessen wird in der Regel ein metallisches Blechbauteil inzwischen zwei Werkzeugen erwärmt und unter Druck einem formgebenden Werkzeug angepasst. *Boeing* hat den Prozess so entwickelt und angepasst, dass Faserverbund-Bauteile durch dieses Verfahren umgeformt werden können. Den Bauteilen werden elektrisch leitende Materialien in die Harz-Matrix integriert, die sich durch den Induktionsprozess stark erhitzen und das Bauteil formbar machen. Die Induktionsspulen sind dabei in dem Werkzeug integriert. Das Werkzeug selbst ist allerdings weder elektrisch noch thermisch leitend und spricht auf den Induktionsprozess nicht an, sodass es bei dem Prozess nur indirekt erwärmt wird. In nachfolgender Abbildung ist der Prozess übersichtlich veranschaulicht. [32]

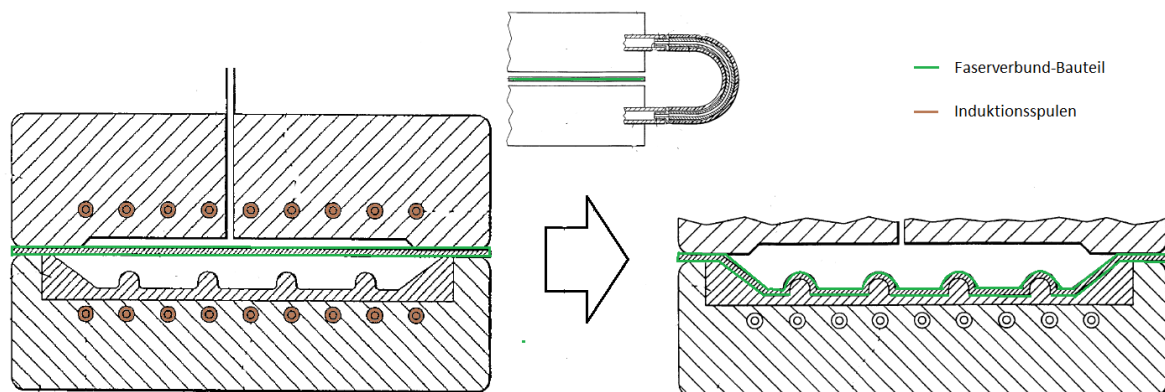


Abbildung 24: SPF mittels Induktion [32]

Bei der thermischen Aktivierung von Bindern in Kohlenstofffaserhalbzeugen spielt die thermische Einbringung eine große Rolle. Die dünnen Halbzeuge müssen schichtweise positioniert, drapiert und schließlich durch thermisches Aktivieren mit einem Binder fixiert werden. Die konventionellen Verfahren der Wärmeleitung und Wärmestrahlung geraten dabei aufgrund der langsamen Prozessgeschwindigkeit, bedingt durch die geringe Erwärmungsgeschwindigkeit sowie die langsame Abkühlung des Binders, an ihre Grenzen. Eine neue Methode, durch die eine schnelle thermische Aktivierung realisierbar ist, wurde am *Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt* entwickelt. Dabei wird über elektromagnetische Felder volumetrische Energie in die Preform eingebracht. Den Kohlenstofffasern werden dabei durch Induktion Wirbelströme induziert, die sich in den durch Lagen unterschiedlicher Orientierung bildenden globalen Leiterschleifen einkoppeln.



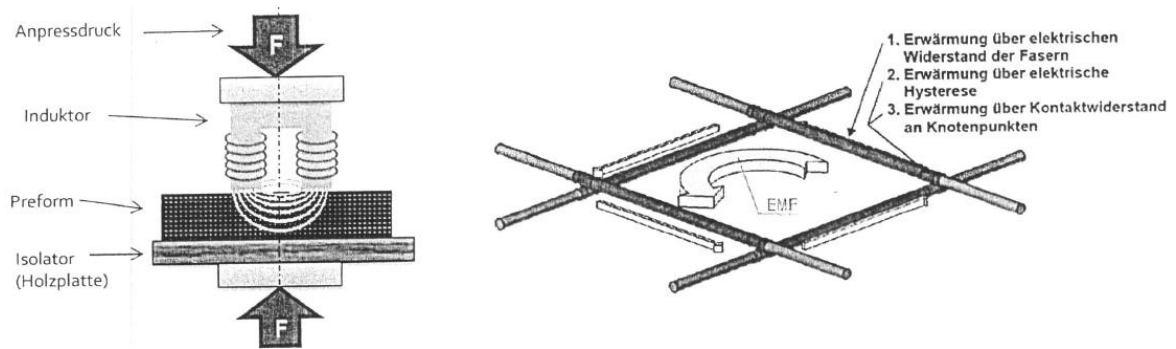


Abbildung 25: Induktion und Leiterschleifen [33]

Die Anwendung der Induktionstechnologie eröffnet dem Verfahren neue Möglichkeiten, sodass dieser Prozessabschnitt um ein vielfaches beschleunigt werden kann. Des Weiteren wird die Flexibilität des Preforms durch eine punktuelle Wärmeeinbringung beibehalten. Die geringe thermische Leitfähigkeit spielt bei der Induktion keine Rolle, sodass sogar neue Dimensionen von Preformen möglich sind. [33]

### 3.5 Nachgeschaltete Qualitätssicherung

Die nachgeschaltete Qualitätskontrolle bezieht sich sowohl auf die Überprüfung der Klebverbindung an sich, als auch auf die Überprüfung der Position der Versteifungselemente nach dem Aushärtezyklus im Autoklaven.

Da die nachgeschaltete Qualitätssicherung nicht zu dem Hauptthema dieses Projektes gehört, soll in diesem Unterkapitel lediglich kurz zu informativen Zwecken darauf eingegangen werden. Hierdurch soll ein Einblick über die Möglichkeiten der Qualitätssicherung verschafft werden.

Das *Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt* kontrollierte in einem Projekt die Versteifungselemente nach dem Autoklavzyklus mit einem optischen 3D Vermessungssystem. Dafür wurde das Tritop System der Firma GOM – *Gesellschaft für optische Messtechnik* verwendet. Das System ermöglicht das Einmessen von Koordinaten dreidimensionaler Bauteile. Dabei sind Merkmale wie Regelgeometrien, Schnitte, Löcher, Winkel uvm. realisierbar. Nach der Koordinatenerfassung werden die Daten verarbeitet und mathematisch oder grafisch dargestellt. Als Referenzwert gilt ein vorher konvertiertes CAD Modell, mit denen die eingemessenen Daten abgeglichen werden. Auf diese Weise ist es möglich Lagetoleranzen, Abweichungen, etc. zu detektieren. [28] [56]

Weitere Möglichkeiten der nachgeschalteten Qualitätssicherung, wie sie auch in diesem Projekt durchgeführt werden, beziehen sich auf eine Sichtkontrolle, eine manuelle Messung und die Laserprojektion.

Um die Klebeverbindungen sowohl nach der Vorverklebung als auch nach der vollständigen Verklebung auf ihre Vernetzung hin zu überprüfen werden Ultraschallmessengergeräte in verschiedenen Variationen eingesetzt und erprobt.

### 3.6 Zusammenfassung

Die Fertigung eines versteiften Flugzeugsegments aus CFK stellt einen sehr komplexen Vorgang vieler verschiedener Fertigungsschritte dar, welcher in Kapitel 3 veranschaulicht wird. Zugleich wird der derzeitige Stand der Forschung und Technik aufgezeigt, der die Möglichkeiten und das Potential einer Prozessoptimierung aufzeigen soll. Bei der Betrachtung wird auf die Verklebung und die dafür notwendigen Schritte der Positionierung/ Fixierung sowie der Qualitätssicherung eingegangen.

In dem Punkt 3.3 werden aktuelle Verklebungen an Beispielen aus der Industrie und Forschung, wie die Flügelverklebung bei *AIRBUS* sowie der Stringerverklebung bei *FFT* erläutert. In 3.4 wird detailliert auf einige Bereiche und Anwendungsbeispiele der induktiven Erwärmung eingegangen, um darzustellen, welche Möglichkeiten sich durch den Einsatz der Induktionstechnologie ergeben. Dabei hat sich gezeigt, dass die induktive Erwärmung bereits in vielen Bereichen der Luftfahrt eingesetzt wird. In dieser Hinsicht ist es denkbar die Technologie in die in 3.3 dargestellten Verfahren zu integrieren um diese effizienter zu gestalten.

Bei der Recherche ist besonders aufgefallen, dass die induktiven Anwendungen im Vergleich zur konventionellen Methode eine Prozessoptimierung realisieren konnten. Darüber hinaus bietet die Applikation ein großes Automatisierungspotential und kann die Prozessgeschwindigkeit als auch -qualität enorm steigern. In den folgenden Kapiteln soll nun untersucht werden, inwiefern sich die Induktionstechnologie auf den Klebprozess von CFK-Bauteilen am Beispiel der Stringerverklebung adaptieren lässt.

## 4 Vorstellung genutzter Anlagen und Materialien

In dem aktuellen Kapitel werden alle Anlagenelemente und Materialien vorgestellt, welche relevant für die wissenschaftlichen Arbeiten und die induktiven Verklebungen sind.

### 4.1 Anlagen

#### 4.1.1 Laser-Projektions-Anlage

Für die Positionsbestimmung der Versteifungselemente in der Rumpfschale wird eine Laserprojektionsanlage verwendet, welche die exakten Positionen der Stringer in die Schale projiziert. Laserprojektoren stellen präzise Umrisse und Formen von Bauteilen auf fast allen Oberflächen dar und dienen dem Erreichen einer hohen Messgenauigkeit.

Der DLR Standort Stade verfügt über ein System der Firma *Laser Projection Technologies (LPT), Inc.* des Typs „LPT12 Laser Projector“, welches in dieser Arbeit benutzt wurde. Als Grundlage für die Projektion dienen CAD-Daten, die mittels der LPT Firmensoftware zu Projektionsdaten verarbeitet werden. Über eine Entfernung zwischen 2m und 15m und einem maximalen Winkel von 60° kann der Projektor den Inhalt der importierten CAD-Objekte darstellen. In Abbildung 26 ist die Kopplung mehrerer Projektoren zu sehen, die genutzt wird um sowohl größere als auch komplexere Bauteile darzustellen. [\[34\]](#)

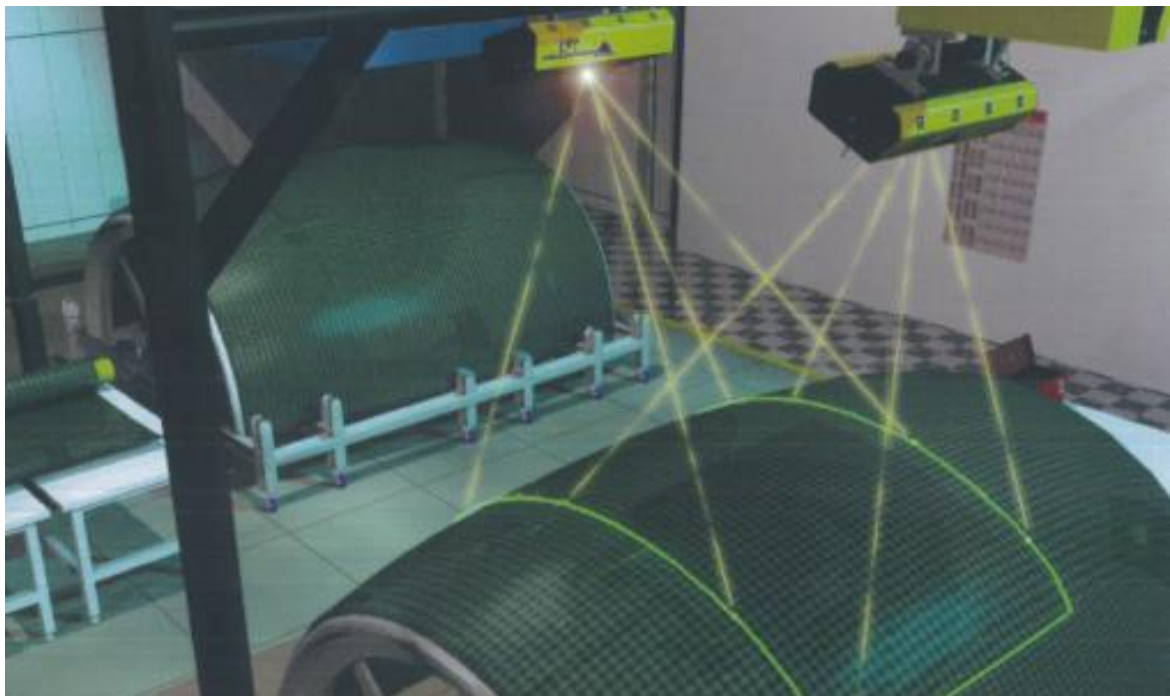


Abbildung 26: LPT Projektionsdarstellung [\[34\]](#)

Vor allem in dem Bereich der Luft- und Raumfahrt werden solche Systeme bspw. für das Legen von Faserlagen, die Projektion von Bauteilen in einem Rumpfsegment oder dem Anzeigen von Lackiervorlagen eingesetzt. Durch die Verwendung solcher Systeme kön-

nen Zeit und Geld eingespart werden, da das umständliche Einmessen entfällt und Fehler in der Produktion frühzeitig vermieden werden können.

### 4.1.2 Induktionsanlage

Die Anlage besteht aus dem Induktionsgenerator und den Induktoren, auf die in den zwei folgenden Kapiteln eingegangen wird. Die in dem Generator erzeugte Leistung wird über die Induktoren in Form eines elektromagnetischen Feldes in das Werkstück eingebracht.

#### 4.1.2.1 Frequenzgenerator

Im Mittelpunkt der wissenschaftlichen Untersuchungen steht in dieser Arbeit der Frequenzgenerator des Typs EW050W der Firma *IFF GmbH, Ismaning*. Einem solchen Generator wird elektrische Energie mit einer definierten Spannung und Frequenz zugeführt, welche wiederum transformiert und an den Induktor weitergeleitet wird. Im Generator selbst wird die Netzwechselspannung vorerst in eine Gleichspannung umgewandelt und in Folge auf die gewünschte Ausgangsfrequenz transformiert. In der folgenden Abbildung 27 ist der verwendete Generator der IFF GmbH abgebildet.



Abbildung 27: Frequenzgenerator Iff Ismaning GmbH [42]

Der Frequenzgenerator ist auf eine Netzspannung von 3 x 400V und eine Eingangsfrequenz von 50-60Hz abgestimmt. Er stellt eine variable Ausgangsleistung bis zu 15kW bereit, die je nach Bedarf zwischen 10% und 100% eingestellt werden kann. Des Weiteren ist die Wechselrichterfrequenz einstellbar zwischen 8kHz und 18kHz sowie der Induktionszeitraum von 0-99,9s einstellbar. Die Anlage ist so konzipiert, dass sie sowohl von

dem Generator selbst, als auch von den Induktionsköpfen betätigt werden kann. Über eine serielle RS232 Schnittstelle ist eine Bedienung computergesteuert möglich. Darüber hinaus können die Parameter gesteuert, dokumentiert und archiviert werden. [42]

In der nachstehenden Abbildung 28 wird der Zusammenhang von Leistung und Frequenz dargestellt. Es soll veranschaulicht werden, dass nicht das komplette Leistungsspektrum bei jeder Frequenz zur Verfügung steht. Im Falle falsch voreingestellter Parameter würde die Lastsicherung den Prozess automatisch beenden.

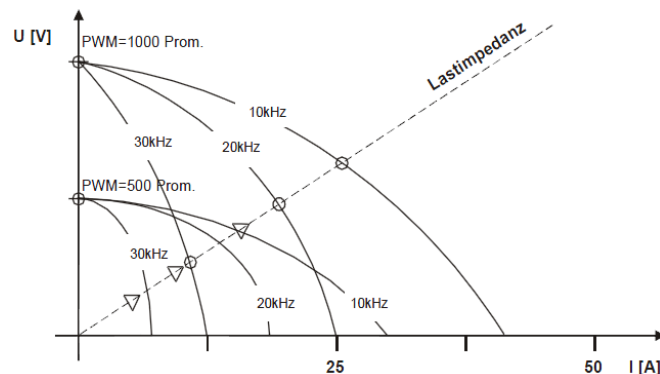


Abbildung 28: Schematische Kennlinienveränderung bei unterschiedlichen Pulsweiten [15]

Die Generatoren dieser Baureihe werden wassergekühlt. Dabei werden die Verluste an eine wassergekühlte Montageplatte abgeführt. Übersteigt diese die Temperatur von 63°C wird die Gerätefunktion unterbrochen. Für die Wasserkühlung bedarf es einer Zu- und Ablaufleitung, die bei den hiesigen Versuchen durch Schlauchtrommeln realisiert und am Hausnetz angeschlossen wurde.

#### 4.1.2.2 Induktor

Die Aufgabe des Induktors besteht darin, die elektromagnetische Energie in Form von elektromagnetischen Wellen auf ein Medium (Bauteil oder Werkstoff) zu übertragen. Einfach beschrieben, besteht ein Induktor lediglich aus einer Spule. Dabei kann in verschiedene Spulenformen unterteilt werden. Gegenwärtig werden Ein-Kreis-Spulen, Zylinder-spulen und Spiralfachspulen verwendet. [43] [44] [45]

Die für die induktive Verklebung verwendeten Induktionsköpfe IS-0616 des Typs „U 80/32/3“ wurden individuell für die Vorverklebung von Stringern von der *Iff GmbH, Isma-ning* angefertigt und haben die Grundmaße 50x70mm. Die Stringerfüße messen an den breitesten Stellen 67,5mm. Um die komplette Fläche des Stringerfußes induktiv erwärmen und so den Klebefilm aufschmelzen zu können soll der Induktor mindestens diese Abmessungen erfüllen. Der Induktorkopf selbst besteht aus einer doppelten Zylinderspule mit einem U-förmigen Eisenkern und ist in isolierendem Epoxidharz vergossen. Das integrierte ca. 1m lange Kabel wurde um ein 4m langes Verlängerungskabel ergänzt, um die Rumpfschale für die Induktionsanlage zugänglich zu machen.



Die Auswahl des Induktors, welcher in folgender Abbildung dargestellt wird, wurde bereits bei den Vorversuchen für die Patentanmeldung getroffen. Die nochmals bestellten Induktorköpfe wurden lediglich in ihrer Größe angepasst und geändert.

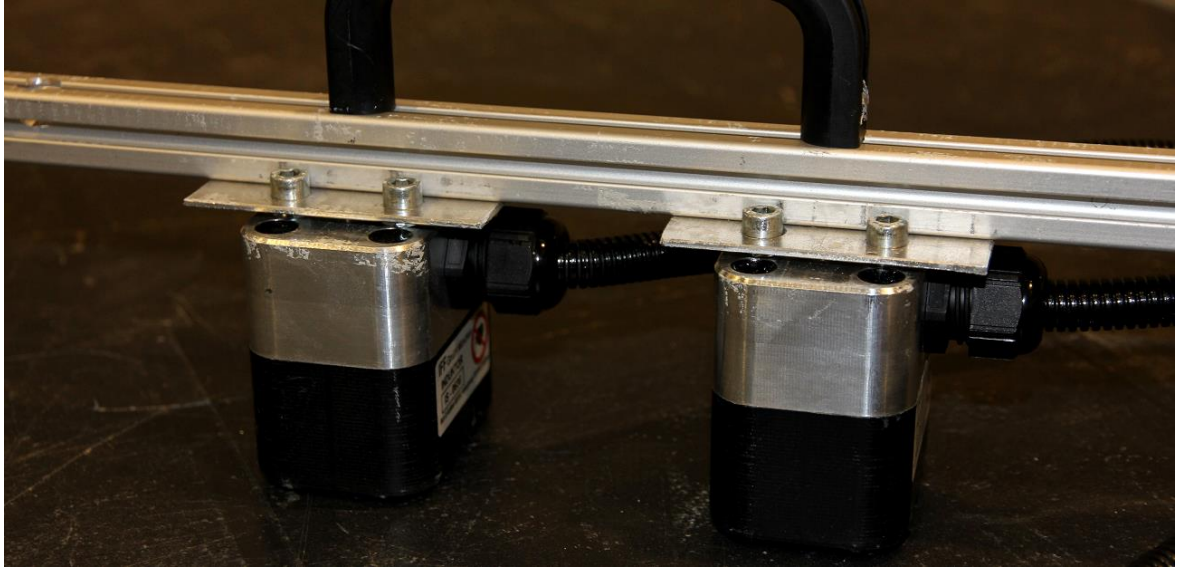


Abbildung 29: Induktionskopf Iff GmbH [38]

Bei der Auswahl und Verwendung sind einige Parameter und Aspekte zu berücksichtigen. Besonders der Einfluss von Spulenform, Eisenkern und Frequenz beeinflusst die Ausprägung des Magnetfeldes. So verändert sich je nach gewählter Spulenform das Magnetfeld, welches sich von flach bis räumlich fokussiert ausbilden kann. Durch die Auswahl kann damit je nach Anwendung die geforderte Eindringtiefe variiert werden. Ferner kann durch die Wahl nichtferromagnetischer umliegender Werkstoffe das elektromagnetische Feld gesteuert werden. Somit wäre eine Fokussierung oder sogar Abschirmung möglich.

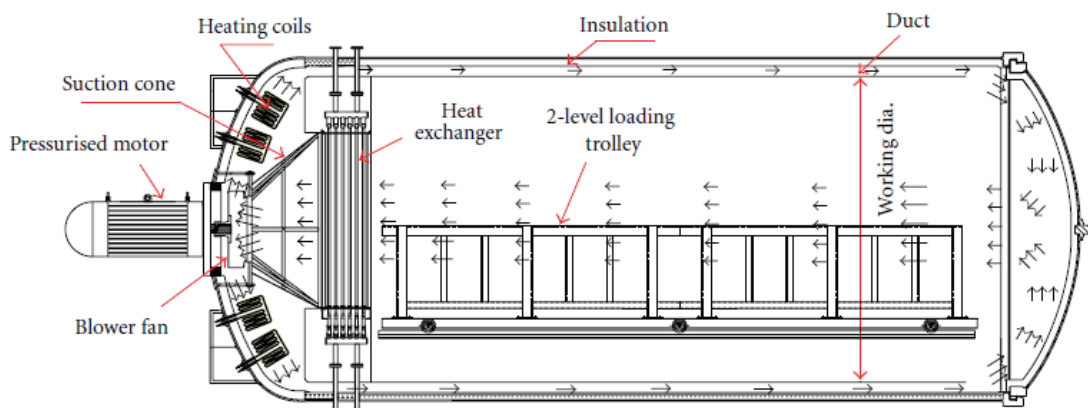
## 4.2 Autoklav

Durch die induktive Vorverklebung der Versteifungssegmente wird eine stabile Fixierung dieser realisiert. Das vollständige Benetzen beider Fügeflächen und das Aushärten erfolgt jedoch unter dem Einfluss hoher Temperatur, Druck und Zeit. Gleichmaßen benötigen Faserverbund-Strukturbauteile spezielle Bedingungen um gefertigt zu werden. Eben diese Umgebungsbedingungen können nur und vor allem in einem Autoklaven umgesetzt werden. Am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Stade steht der größte Forschungsautoklav der Welt. Dieser wurde von der Firma *Maschinenbau SCHOLZ GmbH & Co. KG* entwickelt. In der folgenden Tabelle 2 sind vorerst die wichtigsten Kennwerte aufgeführt.

<b>Geometrische Parameter</b>	Länge	27m
	Nutzraumlänge	20m
	Außendurchmesser	6,5m
	Beladungsdurchmesser	4,5m
<b>Thermische Parameter</b>	Max. Temperatur	410°C
	Max. Heizleistung	3,8 MW
	Max. Heizrate	7 K/min

Tabelle 2: Technische Daten des Autoklaven BALU, DLR Stade [\[5\]](#)

Die verschiedenen Untersysteme des Autoklaven ermöglichen es dem System die Prozessparameter Temperatur, Druck und Vakuum zu realisieren. Das Heiz- und Lüftungssystem sorgt dabei für die Luftzirkulation und Temperatureinstellung. Das Lüftungssystem besteht aus einem Radialgebläse und einem Ringkanal, in dem das heiße Fluid entlang des gesamten Autoklaven transportiert wird und, wie in der Abbildung 30 zu sehen, wieder in den Kesselraum geführt wird. Die Heizung sitzt im direkten Umfeld des Rotors, so dass der Radiallüfter das Gas axial aufnehmen und radial wieder ausstoßen kann. Dabei trifft es auf die Heizelemente und wird erwärmt. Autoklaven werden in der Regel elektrisch beheizt, da die Temperatur besser zu steuern ist und das System sauberer als alternative Heizverfahren ist. Das Heizsystem des Autoklaven besteht aus 372 Heizkörpern, die jeweils eine Heizleistung von 7,5kW aufbringen. [\[10\]](#) [\[7\]](#)

Abbildung 30: Allg. Darstellung des Heiz- und Lüftungssystems eines Autoklaven [\[10\]](#)

Ein fortgeschrittenes Vakuumsystem ist ein wesentlicher Bestandteil heutiger Autoklaven. Das System besteht aus Vakuumpumpen, Vakuum Speichern sowie Mess-, Saug-, und Auslassleitungen, die es ermöglichen ein Bauteil zu evakuieren und dessen Vakuumzustand zu steuern und zu kontrollieren.

Das Drucksystem fördert den Überdruck im Autoklaven und stellt stets den geforderten Druck sicher. Dabei liegt die durchschnittliche Druckaufladung bei 2bar pro Minute. Aufgrund seiner inerten Eigenschaften nutzen heutzutage viele Autoklaven Stickstoff anstelle von Luft als Druckmedium. Die exotherme Reaktion des Harz-Härter-Gemisches und die in Verbindung stehenden hohen Temperaturen würden nicht zuletzt aufgrund des hohen Sauerstoffgehaltes ein erhöhtes Brandrisiko darstellen. Dieser Aspekt wiederum macht Stickstoff zu einem sicherheitsrelevanten Prozessmittel. Hauptsächlich besteht das Stickstoff-Drucksystem aus dem Hauptverdichter, der Stickstoffanlage und den Lagertanks. Das System arbeitet in der Weise, dass der Hauptverdichter die Luft aus der Atmosphäre aufnimmt und sie auf 7 bar verdichtet, wo die Stickstoffanlage letztendlich speichert. Bei dem PSA-Prozess (Pressure Swing Adsorption) wird Stickstoff von der Luft isoliert und somit gewonnen. Der PSA Prozess hat sich zu einem der wichtigsten Verfahren zum Gewinnen von Stickstoff etabliert. Dabei wird eine Reinheit von 99% erreicht. Anschließend wird der isolierte Stickstoff weiter bis auf ca. 20bar komprimiert. Die Verwendung von Stickstoff bringt prozessbedingt viele Vorteile mit sich, bürgt aber aufgrund der aufwendigen Herstellung und Lagerung immense Kosten. [\[23\]](#) [\[7\]](#)

Um die Stickstoffatmosphäre nach einem Zyklus zu kühlen, bedient sich der Autoklav eines speziellen Kühlsystems. Mit einem Kühlmitteldurchsatz von 114m<sup>3</sup>/h sorgt ein Wärmetauscher für das Herabkühlen nach den Zyklen. Während der Kühlphase werden die Flussrate und die Temperatur des Kühlwassers, als auch die Wärmeübertragungsfläche kontrolliert werden. Das System besitzt einen geschlossenen Kühlkreislauf, welcher aus Wärmetauschern im Autoklaven, Wasserpumpen und einer Wasseraufbereitungsanlage besteht. Die Hauptaufgabe liegt dabei darin, das Kühlwasser effizient in kürzester Zeit herunterzukühlen.

Die Entwicklung solcher komplexer Systeme ist multidisziplinär und umfasst die Mechanik, Prozesssteuerung und die gesamte Instrumentierung. Die Computersteuerung ist dabei unerlässlich, da sie verantwortlich für die Ausführung der Aushärtezyklen, für das Starten der verschiedenen Untersysteme, für den Download der verschiedenen Set-Werte, sowie das Laden, Benutzen und Speichern der Prozessdaten und die Prozesskontrolle (Temperatur, Vakuum, etc.) ist. Bei der Benutzung mehrerer Autoklaven ist es möglich diese via LAN zu verbinden um die Effizienz zu steigern und die Ausnutzung zu optimieren. [\[10\]](#) [\[7\]](#)

In der nachfolgenden Abbildung 31 ist der Autoklav des DLR in Stade abgebildet. Vor allem aufgrund der enormen Größe der Anlage, ist er für die Fertigung von kompletten Flugzeugsegmenten der Luftfahrt von Bedeutung.



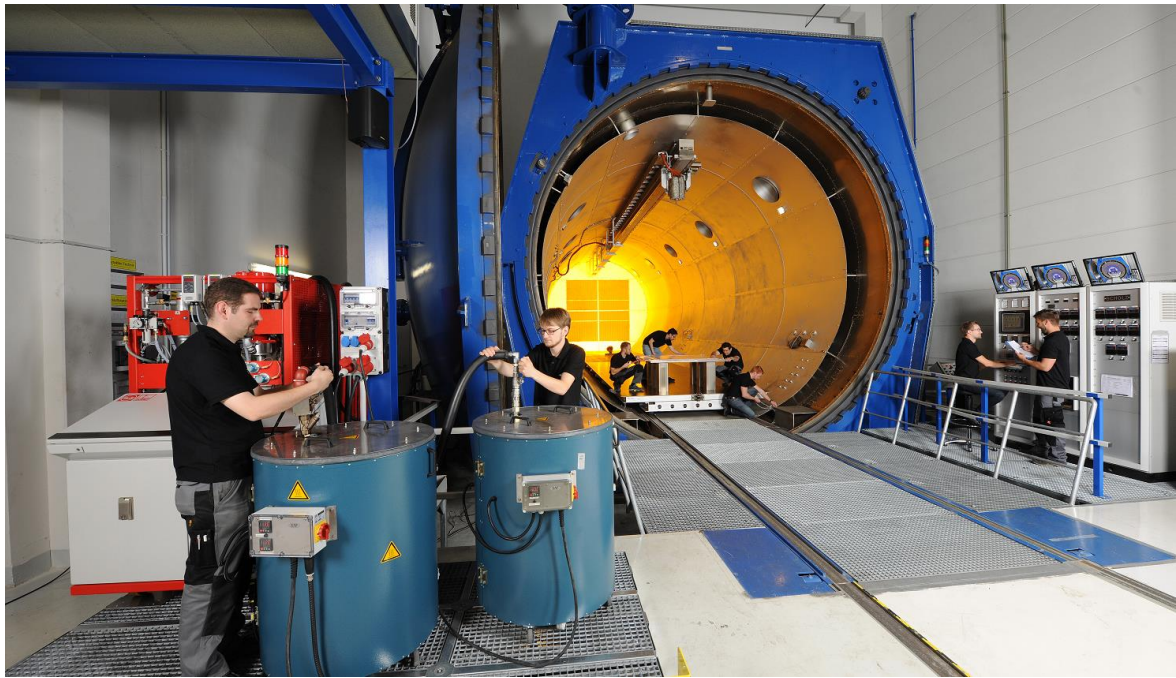


Abbildung 31: DLR Stade Autoklav [\[5\]](#)

### 4.3 Sensorik (Thermokamera, Software)

Um das derzeitige Verfahren zur Vorverklebung von Versteifungselementen zu verbessern, wird der Prozess erweitert. Für eine zuverlässige Prüfung während der Verklebung bedarf es dabei einer berührungsfreien Temperaturmessung.

Zur thermischen Messung der induktiven Klebprozesse wird die Thermokamera A315f der Firma *FLIR Systems GmbH* eingesetzt. Vor allem für die thermisch gestützte Qualitätssicherung ist die Anwendung von großer Bedeutung. Auf diese Weise ist es möglich die entstehenden Oberflächentemperaturen zu messen und Rückschlüsse auf die Temperatur des Klebefilms zu ziehen. Die gemessenen Temperaturen können mit bspw. mit Versuchen mit Temperaturmessstreifen verglichen werden und als Referenz dienen. Durch die Verwendung der Software *IRControlV4.59* der Firma *Automation Technology GmbH* kann jeder Klebprozess dokumentiert und ausgewertet werden.



Abbildung 32: FLIR A315f Thermokamera [\[39\]](#)

Die infrarotbasierte Prozessüberwachung ermöglicht die Erfassung von Temperaturunterschieden sowie der thermischen Verteilung des Bauteils bzw. der Klebeverbindung. Die Kamera ist vollständig über einen Computer steuerbar und als Plug'n'Play-Gerät mit Software-Programmen von Drittherstellern kompatibel. Die Datenübertragung wird durch eine „Gigabit Ethernet Kommunikations-Schnittstelle“ mittels eines Ethernetkabels realisiert und ermöglicht ein 16bit Bild Streaming zum Computer in Echtzeit.

Weiterhin arbeitet das Gerät mit einem hochauflösenden Detektor bei 50Hz auf 640 x 480 Pixeln, der kleinste Bilddetails und geringe Temperaturunterschiede erfasst. So werden auch bei größerer Entfernung eine hohe Genauigkeit und Detailtreue erreicht. Darüber hinaus arbeitet die Kamera mit einem 45°-Objektiv, welches mit einem motorgesteuerten Fokus und Autofokus ausgestattet ist. Die integrierte Highspeed Fenstertechnik Option ermöglicht dem Gerät eine Bildwiederholungsfrequenz im hohen Hz-Bereich. Da die Kamera nach der Schutzklasse IP66 geschützt ist, ist sie vielseitig einsetzbar. [\[39\]](#)

Die weitere und vollständige technische Beschreibung der A315f Thermokamera ist dem Datenblatt im Anhang zu entnehmen.

Die verwendete Software IRControlV4.59 bildet die Grundlage für die Dokumentation und Auswertung der Messungen und Bilddaten. Sie verarbeitet die Daten der Thermokamera in Echtzeit. Selbst für komplexe Herausforderungen ist dafür keinerlei Programmierung notwendig.

Die grafische Oberfläche erlaubt die Erstellung verschiedener Arbeitsbereiche sowie der Definition von Kontrollfunktionen und ermöglicht die Anpassung für individuelle und komplexe Aufgaben.

Die Software ist über GigE, WireFire, Ethernet, und TAXI Schnittstellen ansteuerbar und kann darüber hinaus mit SPS Systemen kommunizieren. Eine Fernsteuerung des Systems wird über RS323 Befehle realisiert. Zur Automatisierung der Systeme können die Kameras über die COM/DCOM Schnittstelle angesteuert werden. [\[40\]](#)

Der Einsatz des optischen und berührungsfreien Messsystems ermöglicht eine schnelle Prozessüberwachung der induktiven Vorverklebung. Durch die problemlose Installation

und Anwendung eignet sich das System nicht nur zur Prozesseinstellung, sondern auch als kontinuierliches System für die Qualitätsüberwachung der Vorverklebung.

#### 4.4 Materialien (Faserverbund, Hilfsstoffe, Klebefolie)

In diesem Kapitel werden sowohl die verwendeten Materialien als auch Gerätschaften angebracht, welche zur Durchführung der praktischen Arbeiten notwendig waren und verwendet wurden. Um einen kompakten Überblick über das Material, deren Eigenschaften und Verwendung zu erhalten, wurde nachfolgende Tabelle erstellt. Die dazugehörigen Datenblätter für die jeweiligen Materialien befinden sich im Anhang.

Material	Hersteller	Eigenschaften	Verwendung
<b>FM 300</b>	Cytec ENGINEERED MATERIALS	Luft- und Raumfahrt zertifizierter Klebfilm zur Verklebung von CFK-Elementen	Verklebung der Verstärkungselemente in der Rumpfschale
<b>Hexply M21e</b>	Hexcel	Prepreg-Material speziell für den A350 entwickelt	Stringer- und Rumpfschalenfertigung
<b>Aceton</b>	Primat		Oberflächenreinigung
<b>Waterworks Depar-ture</b>	Zyvax	Bis 260°C temperaturbeständig	Trennmittel
<b>Vakuumdichtband GS 213</b>	GS General Sealants Inc	Bis 232°C temperaturbeständig	Dichtkit für einen Vakuumaufbau
<b>Ultraweave 1332</b>	Airtech	Breather bis 232°C temperaturbeständig	Vakuumaufbau zur Kraftverteilung und Aufnahme überflüssigen Harzes
<b>Folie LW8035</b>	TimeOut Composite	Bis 215°C temperaturbeständig	Vakuumfolie für Vakuumaufbau

Tabelle 3: Materialtabelle [\[5\]](#)

## 5 Experimentelle Untersuchungen

Im fünften Kapitel werden die Vorversuche auf Basis der theoretischen Grundlagen durchgeführt, dokumentiert und ausgewertet.

Die Herausforderung besteht in der Anwendung und Integration der Induktionstechnologie. Die ersten Versuche am DLR zeigten vielversprechende Resultate, sodass eine Erfindungsmeldung und ein Patent daraus entstanden. Auf diesem Wissensstand baut diese wissenschaftliche Arbeit auf.

Sie verfolgt das Ziel der Weiterentwicklung, Einstellung und Validierung dieses Fertigungsprozesses. Dazu soll der Prozess in allen Optionen so effizient wie möglich eingestellt werden. Vorrangig werden dabei die Induktionsparameter untersucht. Das Zusammenspiel von Frequenz, Leistung und Zeit bestimmt grundlegend die Qualität der Klebung. Des Weiteren soll untersucht werden, welchen Einfluss die Materialdicke des Werkzeuges sowie der zu verklebenden Bauteile hat.

Da das Projekt in Zusammenarbeit mit *AIRBUS* durchgeführt wird und deren Anweisungen in Bezug auf Material und Prozessparameter beachtet werden müssen, bestehen bei der Auswahl des Klebstoffes bzw. des CFK Materials keinerlei Alternativen.

Für die vorgestellten Ziele werden Versuchsmatrizen erstellt um reproduzierbare und verwertbare Ergebnisse sowie eine aussagekräftige Dokumentation zu erhalten.

### 5.1 Bauteilfertigung

Für die Durchführung der Untersuchungen werden Probekörper aus CFK verschiedener Größen und Geometrien benötigt. Dabei handelt es sich um ebene Platten, Schalen sowie die Versteifungselemente. Während die Versteifungselemente vom DLR bereitgestellt werden, müssen die weiteren Bauteile extra angefertigt werden. Die Herstellung der CFK Platten sowie Schalen erfolgt im gleichen Aufbau. Lediglich das Formwerkzeug und die Bauteilgrößen unterscheiden sich voneinander. Als Werkzeuge dienen, wie in Abbildung 33 zu sehen, ein ebener Validierungstisch für die Plattenfertigung und das Rumpfschalenwerkzeug für die Schalenfertigung.

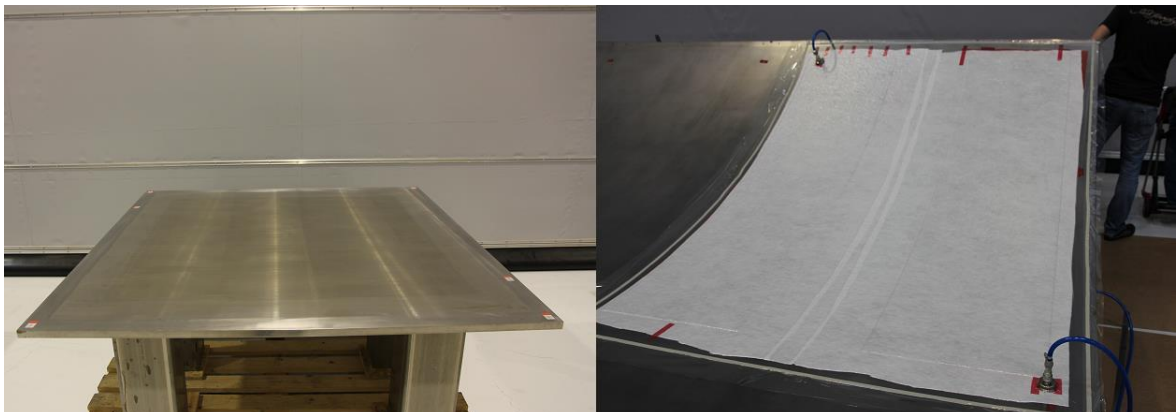


Abbildung 33: Formwerkzeuge zur Bauteilherstellung [38]



Für die Fertigung der Bauteile wird CFK in Form von Prepregmaterial verwendet, welches bei Temperaturen bis zu  $-18^{\circ}\text{C}$  in einem Kühlhaus gelagert wird. Aus diesem Grund wird das Material bereits 24 Stunden vor seiner Verwendung bei Raumtemperatur gelagert und aufgetaut. Für die Versuche wird das Material „Hexply M21e“ der Firma Hexcel mit einer Lagendicke von 0,25mm verwendet. Da das Material exklusiv für Airbus hergestellt worden ist, gibt es kein offizielles Datenblatt. Vollständigkeitshalber wird ein Datenblatt von „M21“ – ein Vorprodukt von „M21e“ – in den Anhang geladen.

Die Platten werden mit einer Größe von 600mm x 600mm gefertigt, die Schalen mit einer Größe von 2000mm x 600mm. Hierzu müssen von den Rollen, auf denen sich das Prepregmaterial befindet, entsprechende Mengen in die entsprechende Größe geschnitten werden. Das geschieht auf einer hierfür speziell angefertigten Vorrichtung, die in Abbildung 34 abgebildet ist.

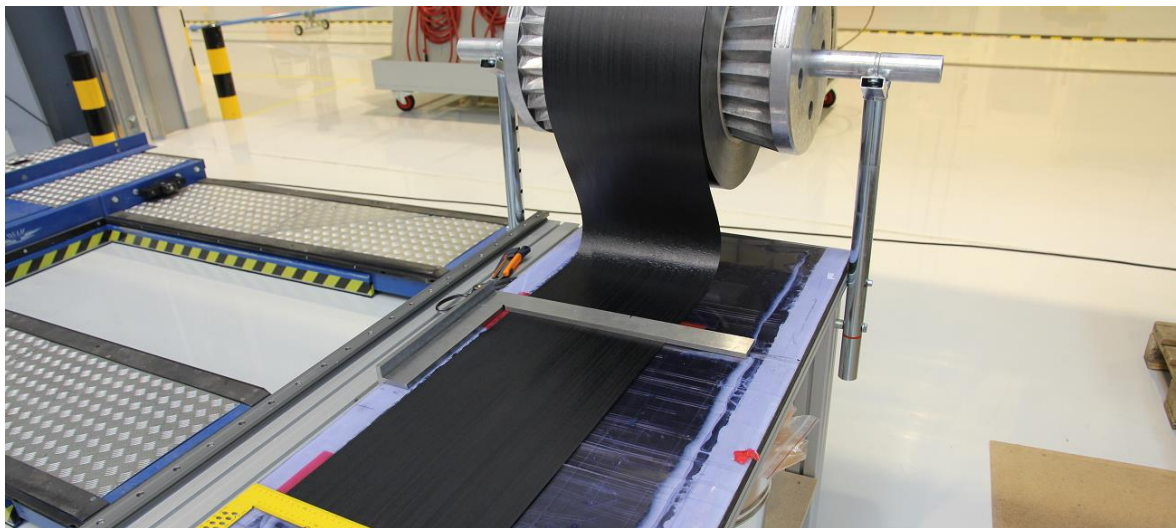


Abbildung 34: Schneiden der Prepreglagen [38]

Im weiteren Verlauf wird auf beide Werkzeugoberflächen Trennmittel aufgetragen um das Entformen der Bauteile zu vereinfachen. Dieser Vorgang wird vor dem Ablegen des Prepregmaterials mindestens drei Mal durchgeführt.

Der Lagenaufbau ist im Kreuzverbund angeordnet und wechselt von Lage zu Lage zwischen einer Ausrichtung in  $0^{\circ}$  und  $90^{\circ}$ . Durch eine Anzahl von 8 Lagen wird eine finale Bauteildicke von 2mm erreicht. Diese ist der Dicke der Rumpfschale ähnlich. Anschließend wird das Laminat durch einen Vakuumaufbau evakuiert, kompaktiert und in einem Autoklav ausgehärtet. Der verwendete Zyklus ist in Abbildung 14 grafisch dargestellt, wird jedoch in den folgenden Zeilen kurz erläutert.

Sobald das Vakuum in dem Aufbau am Bauteil gezogen ist baut der Autoklav einen Druck von 7bar auf. Mit  $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$  wird daraufhin eine Temperatur von  $150^{\circ}\text{C}$  eingestellt und für 180 Minuten gehalten. Anschließend wird der Autoklav weiterhin mit  $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$  auf  $180^{\circ}\text{C}$  aufgeheizt und 120 Minuten gehalten. Nach Erreichen der 120 Minuten wird das System

mit 2-5°C/min gekühlt. Der Autoklavdruck kann abgelassen werden, sobald eine Temperatur von 60°C erreicht ist. Nach dem Abkühlen das Bauteils kann der Vakuumaufbau entfernt und das Bauteil entformt werden. [\[24\]](#)

Für die mechanischen Prüfungen werden Proben angefertigt, die dem klassischen Zugscherversuch der Klebtechnik nach DIN EN 1465 entsprechen. Durch die Vorgabe der Norm für die Zugscherprüfung werden die einzelnen Probenkörper auf eine Größe von 100mm x 25mm dimensioniert. Die vorher gefertigten CFK-Platten werden dafür mit einer Säge der „Maiko Fertigungstechnik GmbH“ am DLR in Braunschweig konfektioniert. Für die geforderte Klebfläche von 25mm x 12,5mm wird der Klebfilm FM 300 mit einem Cuttermesser auf die passende Größe geschnitten.

Auf eine genauere Beschreibung sowie Dokumentation der Fertigung wird in diesem Fall verzichtet. Alle verwendeten Materialien sind tabellarisch aufgeführt und finden sich unter Kapitel [4.3](#) wieder.

## 5.2 Positionierung und Fixierung von Versteifungselementen

Für die verschiedenen Klebversuche ist sowohl eine Fixierung als auch Positionierung der zu verklebenden Bauteile notwendig. Das gestaltet sich bei der Verklebung auf ebener Fläche relativ einfach, wird jedoch bei der Verklebung in dem Rumpfschalensegment zu einer komplexen Herausforderung. Um die Versteifungselemente in dem Rumpfschalensegment an den dafür vorgesehenen Stellen verkleben zu können müssen sie korrekt positioniert und anschließend fixiert werden. Dieser Aufgabe kommt eine große Bedeutung zu, da eine fehlerhafte Platzierung der Elemente nicht nur steifigkeitsverringende Folgen mit sich bringen kann, sondern auch eine erneute Fertigung des Bauteils erfordern kann. Wichtig bei der Positionierung ist die Erreichung der kleinstmöglichen Fügetoleranz, da nur so die computerbasierten Berechnungen auf das fertige Bauteil übertragbar sind.

Im Folgenden werden verschiedene Konzepte zur Positionierung und Fixierung vorgestellt, die sich bei der Suche nach der passenden Herangehensweise entwickelt haben. Dabei handelt es sich um vier verschiedene Methoden, die es zu untersuchen gilt.

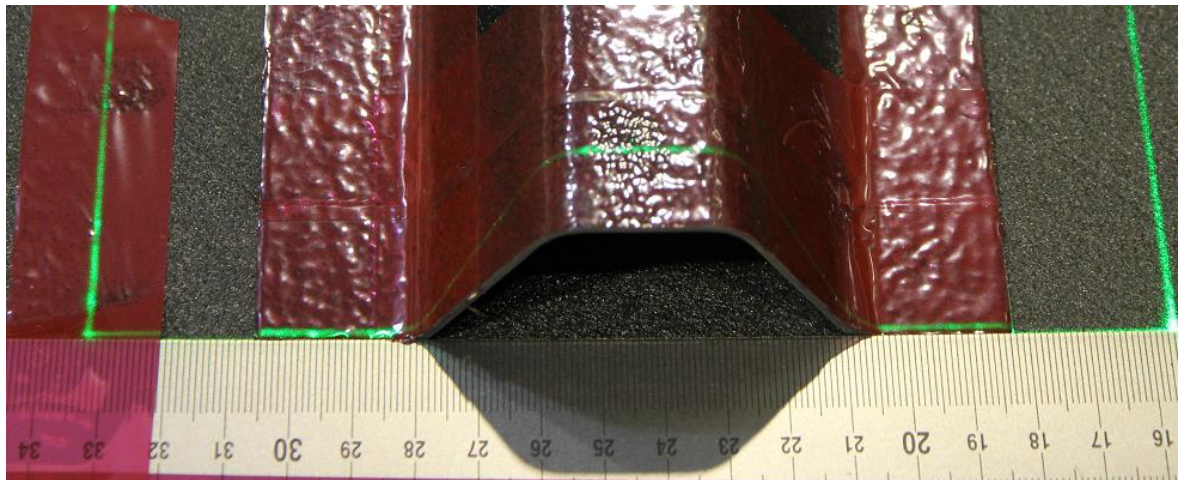


Abbildung 35: Messmittel zur Positionierung von Versteifungselementen

Die ersten Vermessungen der Versteifungselemente werden mit einem einfachen Flachlineal durchgeführt. Dafür wird das Lineal an den Außenseiten der Werkzeugo­berfläche befestigt, um beide Seiten der Stringer einmessen zu können. Das Einmessen erfolgt umständlich durch das Augenmaß, wie in Abbildung 36 zu sehen ist.

Die Messmethode zeigt sich als schnell durchführbar und kostengünstig. Allerdings besteht dabei eine hohe Messungenauigkeit. Durch das manuelle Anbringen der Messlineale sowie das Ablesen der Messwerte können ungenaue Werte entstehen. Aufgrund des Augenmaßes und der Messskalen kann nur bis zu einer bestimmten Genauigkeit geprüft werden. Die genaue Positionierung kann somit durch einzelne Fehler oder deren Aufsummierung stark beeinflusst werden.

Des Weiteren kann diese Methode nicht auf komplexe Bauteile eingehen. Es können stets nur zwei Werte von den Rändern des Werkzeuges abgelesen werden, wobei bei Großbauteilen wie einem Rumpfschalensegment oftmals mehrere Messwerte benötigt werden.

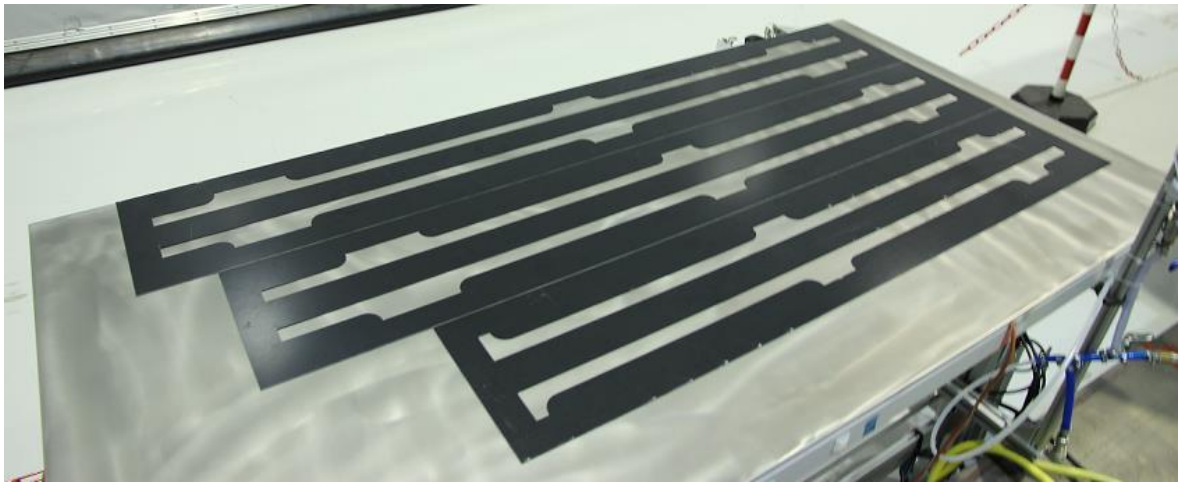


**Abbildung 36: Positionierung Versteifungselemente Lineal** [\[38\]](#)

Eine weitere Methode zur Positionierung von Versteifungselementen ist die Verwendung von Schablonen. Anhand dieser können die Stringer problemlos positioniert und vorverklebt werden. Jedoch ist diese Methode in vielerlei Hinsicht sehr aufwändig. So müssen die zahlreichen Schablonen erst zeitaufwändig gefertigt werden. Hinzu kommt, dass sie nur einseitig nutzbar sind, da sie durch ihre vorgegebene Form und Größe lediglich für einen bestimmten Stringer Verwendung finden.

Des Weiteren können bei dieser Messmethode ebenfalls Messungenauigkeiten auftreten, da hier die Schablonen manuell eingemessen werden müssen. Aufgrund ihrer rechteckigen Form lassen sie sich einfacher anordnen und messen, müssen jedoch trotz allem manuell angebracht werden. Dabei kann es zur Aufsummierung fehlerhafter Messungen kommen. In Abbildung 37 sind verschiedene Schablonen abgebildet, die bei dieser Arbeit verwendet wurden.

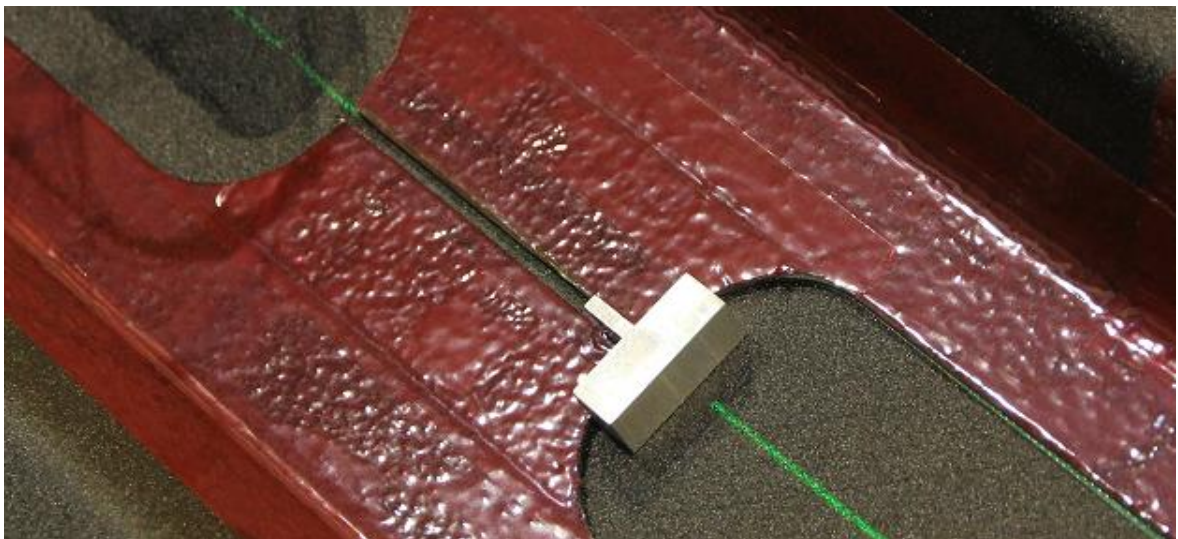




**Abbildung 37: Positionierung Versteifungselemente Schablone** [\[38\]](#)

Bei der Überprüfung der voll verklebten Stringerelemente nach dem Autoklavzyklus stellen sich Abstandshalter, wie sie in Abbildung 38 zu sehen sind, als gute Alternative für die Abstandsüberprüfung heraus. Bei dieser Methode wird ein Stringerelement eingemessen und platziert. Die folgenden Stringer richten sich dann mittels des Abstandshalter nach dem jeweils vorherigen aus.

Jedoch ist die Gefahr der Aufsummierung der Fehler bei dieser Methode am höchsten und dient eher die Qualitätskontrolle nach dem Verklebungsprozess im Autoklaven.



**Abbildung 38: Positionierung Versteifungselemente Abstandshalter** [\[38\]](#)

Die vierte Methode der Stringerpositionierung wird mit Hilfe einer Laserprojektionsanlage durchgeführt. Dabei werden das Bauteil und die zu verklebenden Elemente mittels Laserprojektion auf dem Werkzeug projiziert.

Eine detaillierte Systembeschreibung ist unter dem Punkt [4.1.1](#) in der Vorstellung der genutzten Anlagen zu finden. Die Anwendung des Systems kann anhand der Vorversuche



unter den Punkten [5.3.2](#), [5.3.3](#) oder dem Hauptversuch unter dem Punkt [6.2.1](#) betrachtet werden.

Die Laserprojektion erlaubt es eine Vielzahl an komplexen Formen und Bauteilgrundrissen gleichzeitig oder nacheinander anzuzeigen, ohne manuelle Messmittel einsetzen zu müssen. Das erleichtert die Arbeit und steigert die Messgenauigkeit. Weiterhin können Bauteile in komplexen Formen wie Rumpf- oder Flügelschalen problemlos projiziert werden.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass in den Bereichen wie der Luft- und Raumfahrt, in denen eine sehr hohe Maßgenauigkeit erforderlich ist und in denen zum Teil per Hand gearbeitet wird, die Messmethode mittels Laserprojektion eine sehr gute Alternative zu den computergesteuerten und vollautomatisierten Verfahren darstellt. Als hilfreich für die nachgeschaltete Qualitätssicherung haben sich die Abstandshalter erwiesen. Mit ihnen kann ein Verrutschen der verklebten Elemente durch einfaches anhalten überprüft werden.

Nach dem Detektieren der Stringerposition sowie der Positionierung dieser folgt die Vorverklebung. Ein wichtiger Aspekt dabei ist die Fixierung der Elemente vor dem Verkleben. Nach dem Ablegen der Versteifungselemente besteht die Gefahr des Verrutschens dieser. Dies kann sowohl durch Berührungen beim Klebeprozess selbst oder durch eine bauteilbedingte Schräglage erfolgen. Vor allem für die Steifigkeit des Bauteils, welche durch die Versteifungselemente erreicht wird, ist ein positionsgenaueres Ablegen von enormer Bedeutung. Für die Fixierung stehen ebenfalls mehrere Möglichkeiten zur Auswahl.



**Abbildung 39: Mittel zur Fixierung von Versteifungselementen**

Dafür werden die in Abbildung 39 dargestellten Methoden getestet.

Das Halten per Hand sowie das Befestigen mittels Klebeband stellt in beiden Varianten ebenfalls eine einfache Methode dar. Jedoch sind beide Varianten umständlich anzuwenden und können die Fixierung teilweise nicht erfüllen.

Bei dem manuellen Halten per Hand ist mindestens eine weitere Person notwendig, sobald das Element induktiv verklebt werden soll und birgt somit einen erhöhten Arbeitsaufwand. Bei den Versuchen für diese wissenschaftliche Arbeit wurde mit Stringerlängen von maximal 3m gearbeitet. Die reellen Längen in der industriellen Fertigung messen zwischen 10m und 15m und erschweren somit die Handhabbarkeit um ein Vielfaches.

Das Befestigen mittels eines Klebebandes bedarf ebenfalls einer weiteren Person, da das Halten und Kleben nur sehr aufwendig zu realisieren ist. Des Weiteren müssen die Klebebänder zu späterer Zeit wiederum entfernt werden, was nochmals einen erhöhten Arbeitsaufwand bedeutet.

Die Befestigung mit mechanischen Klemmen ist aus früheren Projekten am DLR bekannt. Da die Befestigung lediglich am Werkzeugrand möglich ist, ist der Einsatz der Klemmen nur begrenzt möglich. In dem Fall muss durch das Werkzeug die Möglichkeit zur Fixierung der Klemmen gegeben sein. Weiterhin ist es nachteilig, dass ein Element über die komplette Werkzeugbreite verlaufen muss um von den Klemmen beidseitig fixiert werden zu können. Das Werkzeug und die zu verklebenden Elementen müssten so stets aufeinander abgestimmt sein.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Fixierung mit Magneten. In der CFK-Fertigung werden Werkzeuge aus Stahl und Stahllegierungen gefertigt, da diese einen geringeren Wärmeausdehnungskoeffizienten besitzen als Aluminium. Aufgrund der Anwendung von Stahlwerkzeugen können Magnete mit in die Fertigung integriert werden. Dafür werden die zu verklebenden Bauteile positioniert und anschließend mit Magneten fixiert. Nach der induktiven Verklebung können sie einfach wieder entfernt werden. Zur Anwendung kommen spezielle Neodym Magnete, die sich durch ihre hohe Haltekraft bei einer vergleichsweise kleinen Geometrie auszeichnen. Die Magnete sind individuell einsetzbar, da sie sich in ihrer Form und ihrer Haltekraft unterscheiden. Somit können sie jedem beliebigen Bauteil angepasst und dort platziert werden.

Um die passenden Magneten für die Fixierung der Stringer in der Schale zu finden werden Magnete verschiedener Größen und Stärken getestet. Unterschieden wird dabei nach den in Tabelle 4 und Tabelle 5 ersichtlichen Kriterien. Für den Ablauf bei dem Verkleben ist es von enormer Bedeutung, dass beim Aufsetzen der Induktionsköpfe die Stringer nicht verrutschen. Eine dementsprechende Traglast der Magnete ist somit Grundvoraussetzung. Trotz der geforderten Haltekraft dürfen die Magnete den Ablauf durch ihre Größe und Handlichkeit nicht behindern und müssen ohne großen Aufwand wieder vom Werkzeug zu entfernen sein. Folgende Abbildung 40 zeigt die Anwendung der Magnete in dem Rumpfschalenwerkzeug für die Stringerverklebung.

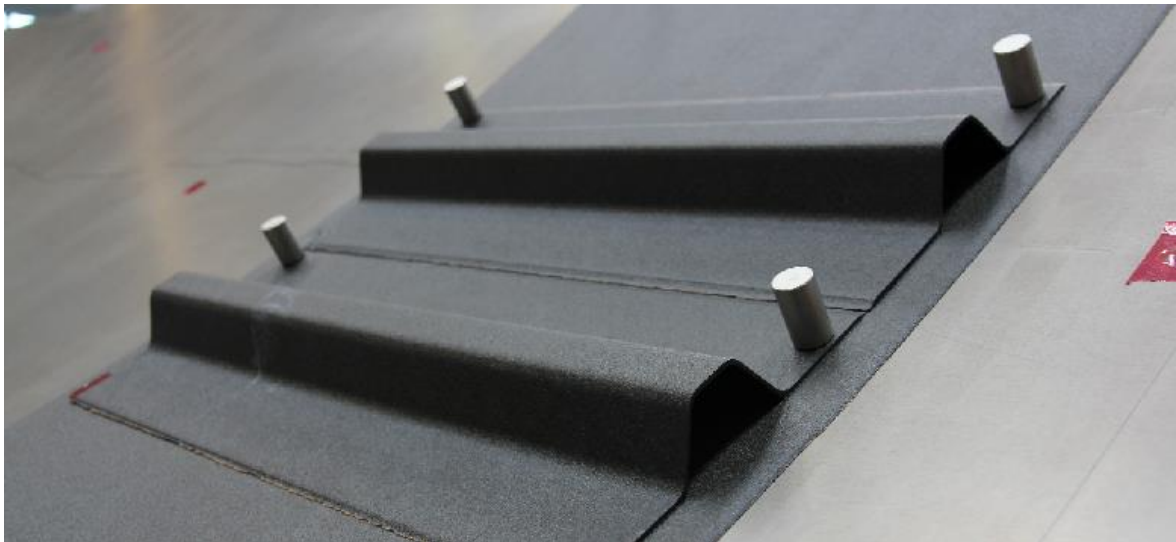


Abbildung 40: Fixierung von Versteifungselementen mit Magneten [38]

Anhand folgender Kriterien wird ein Magnet selektiert, der bei der Verklebung zum Einsatz kommen soll. Die farbig hinterlegten Werte finden sich auf einer Skala von 1 für sehr gut, über 2 für ausreichend bis 3 für ungeeignet wieder. Aus der Summe der Bewertungen ergibt sich dann der für diese Anwendung geeignete Magnet.

Die Magneten werden für zwei Anwendungen geprüft. Die Werte der Tabelle 4 beziehen sich lediglich auf die Tests, bei denen die Rumpfschale in dem Werkzeug fixiert wird.

Die Werte der Tabelle 5 zeigen die Ergebnisse der Fixierung der Stringer in der Schale.

Eigenschaften	Stabm. 15x50	Stabm. 20x34	Scheibenm. 20x10	Scheibenm. 60x5	Quaderm. 20x20x10	Quaderm. 30x12x12	Quaderm. 30x15x6	Würfelm. 12x12x12	Würfelm. 15x15x15	Würfelm. 20x20x20
Traglast in [kg]	13	19	12	22	14,2	17,5	10	11	17	25
benötigte M.	4	2	4	2	4	2	4	4	2	2
Haftung	2	1	1	1	2	1	2	2	1	1
Handlichkeit	1	1	3	3	3	2	3	1	1,5	2
Größe/ Behind.	2	1,50	1	2,5	1	1	2	1	1	1
Fazit	5	3,5	5	6,5	6	4	7	4	3,5	4
	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 4: Tests Magneten - Schale in Werkzeug

Eigenschaften	Stabm. 15x50	Stabm. 20x34	Scheibenm. 20x10	Scheibenm. 60x5	Quaderm. 20x20x10	Quaderm. 30x12x12	Quaderm. 30x15x6	Würfelm. 12x12x12	Würfelm. 15x15x15	Würfelm. 20x20x20
Traglast in [kg]	13	19	12	22	14,2	17,5	10	11	17	25
benötigte M.	4	2	2	2	4	4	4	>4	4	2
Haftung	2	1	1	1	2	2	2	2	1	1
Handlichkeit	1,5	1	3	3	3	2	3	1	1,5	2
Größe/ Behind.	1,5	1	1	2	1	1	2	1	1	1
Fazit	5	3	5	6	6	5	7	4	3,5	4
	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 5: Tests Magneten - Stringer in Schale

Aus den Tests geht der Stabmagnet (20x34) als geeignet hervor, da er eine hohe Haltekraft aufweist und sich als handlich im Umgang erwiesen hat.

Optional bestünde die Möglichkeit, die Positionierung und Fixierung als einen automatisierten Prozess ablaufen zu lassen. Dafür würden beide Prozesse zeitgleich automatisiert über einen Roboterarm erfolgen. Vor allem für eine vollautomatisierte Fertigungsstrecke in der industriellen Fertigung würde das einen enormen Fortschritt bedeuten.

### 5.3 Vorverklebung von Versteifungselementen

Im Rahmen des EU Projektes wird ein Full Scale Demonstrator in Form eines Rumpfschalensegmentes hergestellt, an dem die einzelnen Projekte ihre Entwicklungsergebnisse präsentieren. Der praktische Teil dieser wissenschaftlichen Arbeit schließt mit der induktiven Vorverklebung der Versteifungselemente an dem Demonstrator ab und soll die angestrebten Prozessergebnisse aufzeigen. Bis dahin wird die Einstellung der Prozessparameter in mehreren Schritten erfolgen, um optimale Ergebnisse bei der Vorverklebung an dem Demonstrator realisieren zu können.

In dem Projekt werden die Bauteile im Secondary-Bonding-Verfahren miteinander verbunden. Das bedeutet, dass sowohl die Stringer als auch die Rumpfschale im ausgehärteten Zustand miteinander verbunden werden. Aus diesem Grund werden sich die Untersuchungen vorwiegend auf die Verbindung zweier ausgehärteter CFK-Bauteile beziehen. Projektübergreifend ist geplant, die induktive Erwärmung ebenfalls beim Co-Bonding-Verfahren anzuwenden. Dabei wird ein unausgehärtetes Faserverbund-Bauteil mit einem ausgehärteten Faserverbund-Bauteil verbunden. Es ist vorstellbar, dass sich aufgrund der unterschiedlichen Materialzustände Differenzen bei der Temperaturentwicklung ergeben. In Bezug darauf werden die Induktionsversuche beim Co-Bonding mit in die Versuchsreihe integriert. Es werden dabei ausgehärtete Stringer mit einer unausgehärteten Rumpfschale verbunden. Um die unterschiedlichen Aufwärmmethoden miteinander vergleichen zu können werden alle Proben durch induktives Erwärmen sowie durch die Erwärmung mit einem Heizelement vorverklebt.

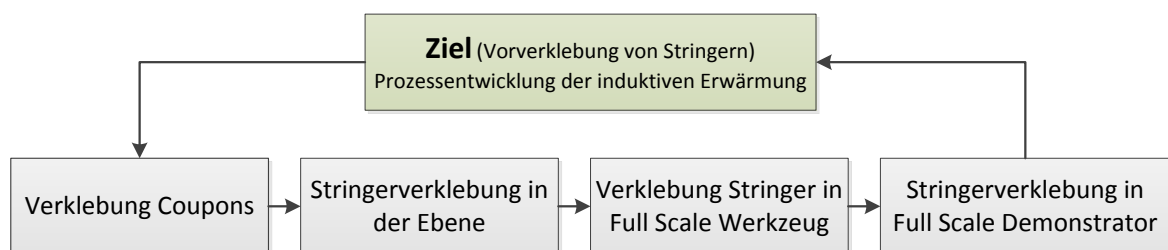


Abbildung 41: Vorgehensweise zur Einstellung der Induktionsparameter

Abbildung 41 zeigt grafisch die Vorgehensweise, nach der die Einstellungen als auch Erprobungen der Parameter durchgeführt werden.

Dabei werden die Versuche umfangreich überwacht und dokumentiert. Jeder Durchgang wird thermografisch überprüft, da vorrangig die Temperaturen entscheidend bei der Verklebung sind. Bei den variablen Parametereinstellungen kann so die Änderung des Tem-

peraturverlaufes erfasst und bewertet werden. Weiterhin ist geplant die Klebeflächen nach dem Prozess mittels Ultraschall zu untersuchen um Aufschluss über die Qualität der Vorverklebung zu erhalten. Abschließend werden die Proben mechanisch durch einen Zug-Scher-Versuch untersucht um einen Wert für zulässige Belastungen zu erhalten.

Für die Auswertung und Parametereinstellung ist vorrangig die Temperatur von Bedeutung, da die Klebefolie nach den Angaben des Herstellers *Cytec Industries Inc.* [49] in dem Datenblatt zwischen 45°C und 50°C beginnt zu reagieren. Weiterhin können mit der Thermokamera die Temperaturen an der Oberfläche des Bauteils detektiert werden. Um Rückschlüsse auf die tatsächliche Temperatur der Klebefolie machen zu können, die sich zwischen den Bauteilen befindet, zielen die Untersuchungen auf eine Oberflächentemperatur von 55°C ab. Die genannte Oberflächentemperatur setzt sich aus zwei elementaren Gründen zusammen. Die Fertigungsrichtlinien (AIPI) von Airbus untersagen eine Temperatur oberhalb von 55°C auf der Oberfläche des Hautfeldes, da das Prepregmaterial somit frühzeitig beginnt auszuhärten. Weiterhin haben Versuche gezeigt, dass auf der Unterseite des Stringers eine Temperatur von 53,5°C herrscht, wenn auf der Oberfläche 55°C zu verzeichnen sind. Dabei ist zu erwähnen, dass das Bauteil zugleich auf direktem und indirektem Wege erwärmt wird. Das elektromagnetische Wechselfeld erzeugt auf der einen Seite direkt Wärme im Bauteil selbst, erwärmt aber zugleich das Werkzeug darunter. Dieses gibt somit nochmals Wärme durch reine Wärmeleitung an das Bauteil ab.

Das Ziel der Vorverklebung besteht lediglich in der handfesten Fixierung der Stringer in der Rumpfschale, um ein Verrutschen bei dem Vakuumaufbau und während des Autoklavprozesses zu vermeiden. Die mechanischen Kennwerte dienen daher ersten Vergleichs- bzw. Richtwerten.

### 5.3.1 Versuchsreihe 1 - Verklebung der Coupons

In dem ersten Versuch soll die Induktionsanlage eingestellt werden. Dabei geht es um den Einsatz der Anlage selbst, die Einstellung der Parameter sowie die Ermittlung der Einflussfaktoren. Die Einstellung der Parameter wird durch die Verklebung von kleinen CFK Platten (Coupons) erprobt, welche eine vergleichbare Dicke wie das Endbauteil aufweisen. Die Versuche werden bei verschiedenen Induktionsparametern, auf die später genauer eingegangen wird, durchgeführt. Abbildung 42 stellt in Kurzform die Vorgehensweise und Ziele der ersten Versuche dar.

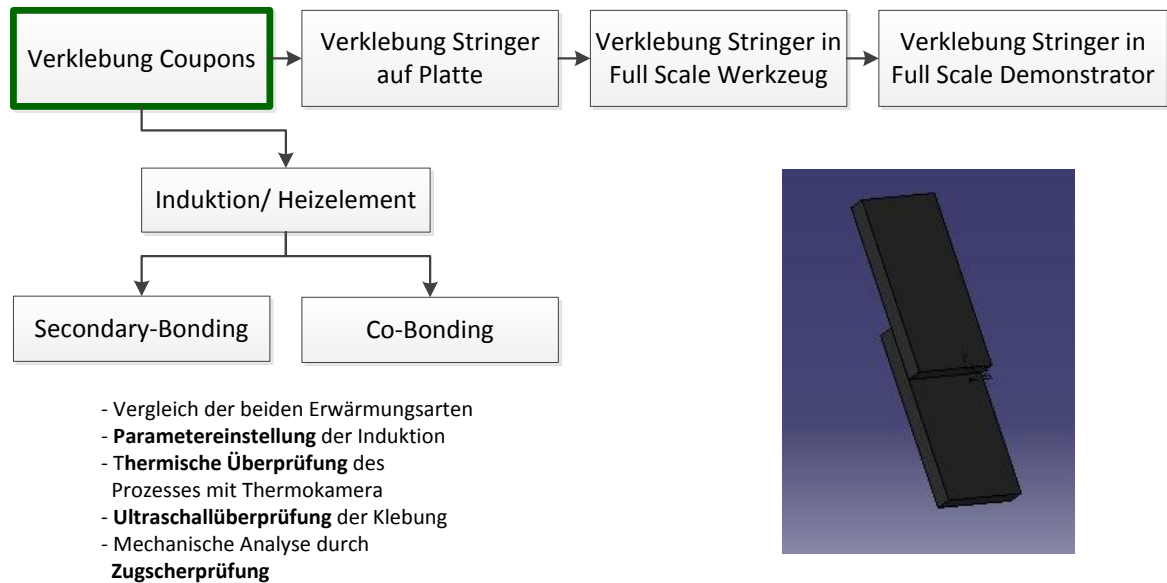


Abbildung 42: Schritt 1 Vorverklebung

Ziel der Versuchsreihe ist es, die Auswirkung der individuell einstellbaren Induktionsparameter in Bezug auf die Temperaturentwicklung sowie die Einflüsse durch die unterschiedlichen Werkzeugmaterialien zu bestimmen. Dafür stehen ein Validierungstisch mit einer Materialdicke von 25mm sowie zwei Stahlbleche der Dicken 2mm und 4mm für Versuchszwecke bereit. Da die Rumpfschale in der Industrie auf einem in der Regel 20mm dicken Stahlbauteil, aber auch auf anderen Werkzeugen, gefertigt wird soll die Auswirkung verschiedener Werkzeugdicken sowie Materialien untersucht werden. Der Validierungstisch, welcher am DLR für Thermografieversuche im Autoklaven verwendet wird, eignet sich aufgrund seiner stabilen Form und ebenen Auflagefläche besonders gut für die Versuche.

Weiterhin wird jede Induktionsverklebung mittels einer Thermokamera überwacht. Die daraus gewonnenen Daten werden in Kapitel [5.4](#) ausgewertet. Für die Parametereinstellungen der induktiven Verklebung werden Versuchsreihen erstellt. So werden die variablen Parameter Zeit und Leistung nach jedem Versuch verändert. Ziel dabei ist es, die Temperaturveränderung zwischen den verschiedenen Einstellungen thermografisch zu erfassen. Es hat sich gezeigt, dass eine Aufnahme von fünf Messungen pro Parameter zur Feststellung der Reproduzierbarkeit notwendig war. So konnten Ausreißer durch die Eliminierung des höchsten und niedrigsten Wertes ausgegliedert werden. Aus den verbleibenden Werten wird der Mittelwert gebildet. Mit den ermittelten Daten wird anschließend ein Diagramm mit dem Bezug von eingestellten Parametern zur erreichten Temperatur angestrebt. Zusätzlich werden in Kapitel [5.4](#) die erreichten Zugscher-Ergebnisse den jeweiligen Temperaturen zugeordnet und ausgewertet.

Im Folgenden (Abbildung 43) wird grafisch die Vorgehensweise der Parametereinstellungen erläutert. Dabei variiert die Zeit der Induktionsprozesse zwischen einer, zwei und drei Sekunden, die Leistung zwischen 20% und 40% der Ausgangsleistung des Generators (15kW).

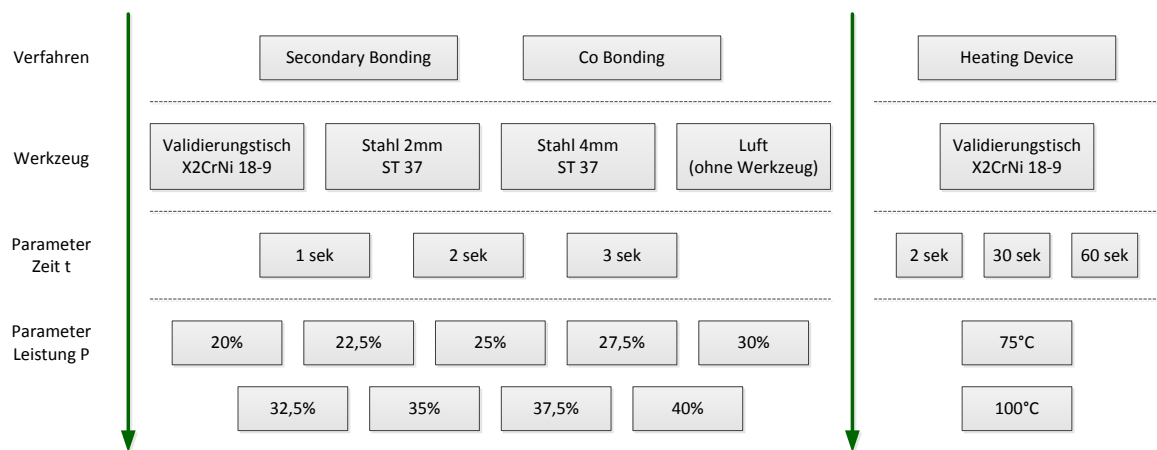
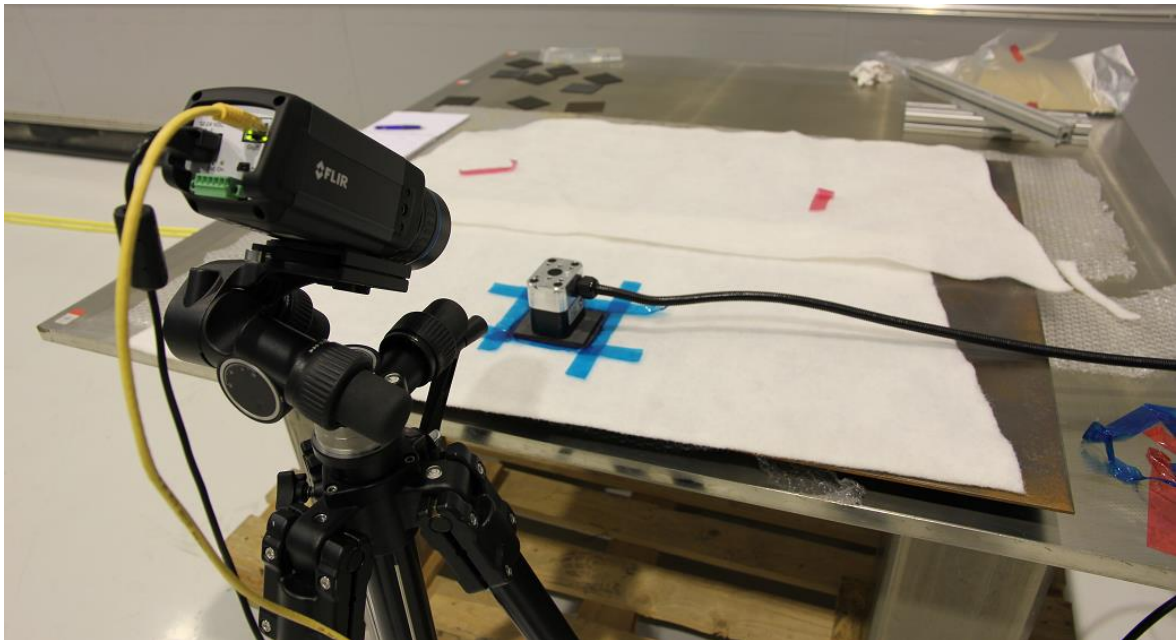


Abbildung 43: Versuchsaufstellung

Um den Induktionsprozess mit dem aktuellen konventionellen Heizprozess zu vergleichen wird eine zusätzliche Versuchsreihe für das Heizelement (Heating Device) erstellt, welche ebenfalls in Abbildung 43 dargestellt ist. Diese wird ausgehend von den Prozessparametern der Airbus Stringervorverklebung erstellt. Nach [\[47\]](#) dauert der Vorgang zwischen 30 und 60 Sekunden. An diesen Werten orientieren sich die durchgeführten Aufheizzeiten. Mit dem Heating Device wird bei drei verschiedenen Zeiten verklebt. Dabei ist die Dauer von zwei Sekunden an die angestrebte Induktionszeit angelehnt. Die Dauer von 30 und 60 Sekunden soll vergleichbare Werte der industriellen Fertigung liefern. Darüber hinaus wird die Verklebung mit zwei verschiedenen Ausgangstemperaturen durchgeführt.

Abbildung 44 zeigt den dafür verwendeten Versuchsaufbau. Nach und nach werden die Coupons mit den verschiedenen Parametern, wie in der Versuchsaufstellung beschrieben, induktiv erwärmt und miteinander verklebt. Die Thermokamera erfasst bei jedem Induktionsvorgang die von der Klebefläche ausgehenden Temperaturen. Diese werden gesammelt und ausgewertet. Die Parametereinstellung, bei der eine Temperatur von 55°C erreicht wird, wird für die weiterführenden Versuche verwendet.

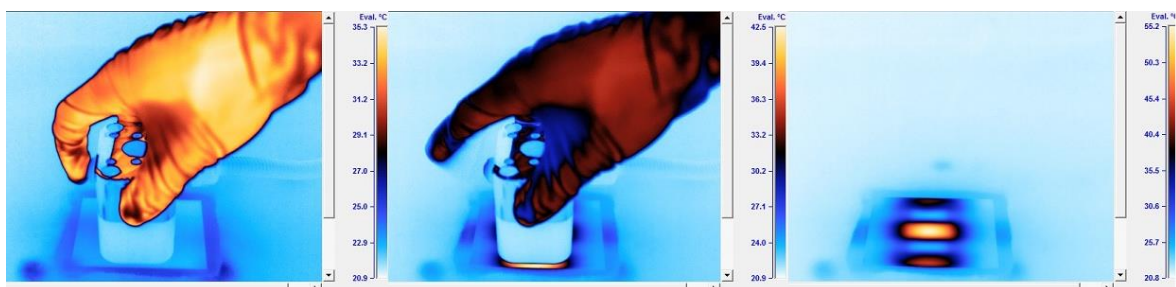




**Abbildung 44: Versuch 1 - Verklebung Coupons (FLIR A315f Thermokamera) [38]**

Die detaillierten Versuchsergebnisse sowie deren Auswertung sind unter Kapitel [5.4.1](#) zu finden. Die weiterführenden Versuche werden für den Aufbau im Secondary Bonding mit einer Leistung von 32,5% (4,875kW) bei einer Induktionszeit von zwei Sekunden durchgeführt. Mit dieser Parametereinstellung wurde auf der 4mm Stahlplatte eine Temperatur von 55,1°C erreicht. Bei dem Aufbau im Co Bonding Verfahren wurde mit 27,5 % der Ausgangsleistung (4,125kW) eine Temperatur von 56,9°C dokumentiert.

Die Werkzeugeigenschaften kommen denen des Rumpfschalenwerkzeug in Bezug auf Material und Dicke am nächsten und werden aus diesem Grund für die weiteren Versuche angewandt. Abbildung 45 zeigt den Verlauf der induktiven Vorverklebung mittels der thermografischen Aufnahmen. Dabei ist die Temperaturentwicklung nach der Reihenfolge der Bilder zu erkennen.



**Abbildung 45: Induktionsprozess thermografisch dargestellt**

Das linke Bild zeigt den Temperaturzustand unmittelbar vor der induktiven Erwärmung. In dem weiteren Verlauf ist auf dem mittleren Bild die Temperaturentwicklung während des Prozesses deutlich im Randbereich zu erkennen. Dies erweckt den Eindruck einer homogenen Wärmeausbreitung unter dem Induktionskopf.

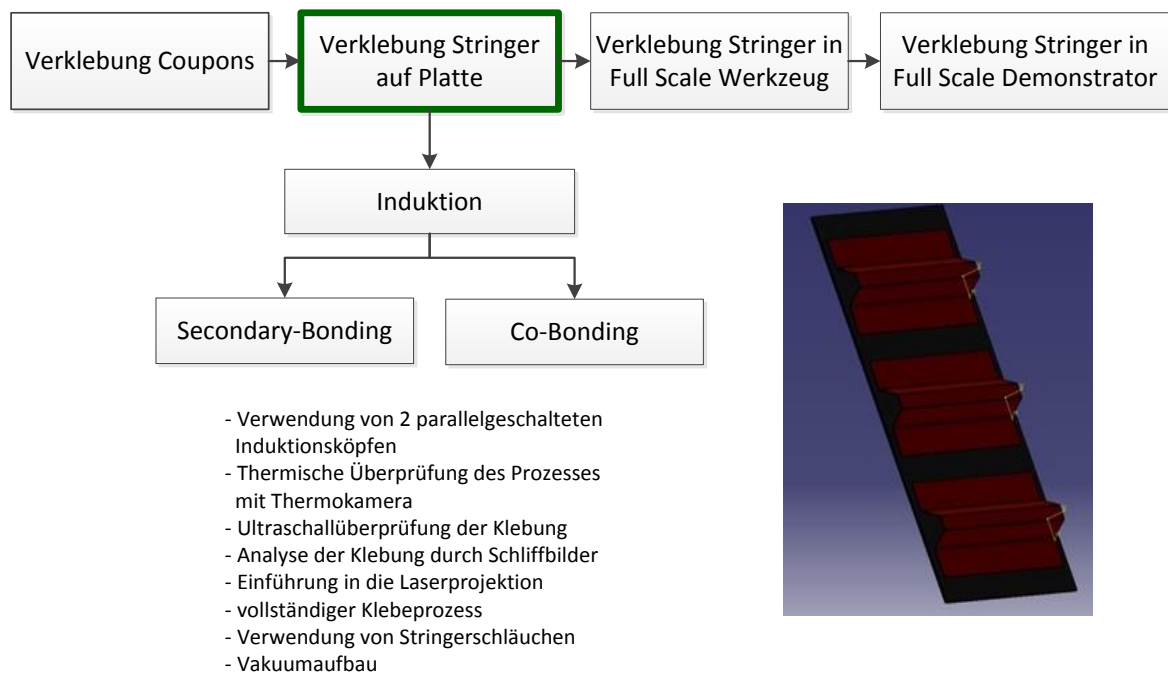


Dass sich die Wärme nicht homogen ausgebreitet hat, sondern in der Mitte und in dem Randbereich stark ausgeprägt ist wird durch das rechte Bild deutlich. Es entstehen so gesehen drei Bereiche, in denen der Wärmeintrag stattfindet. Diese Bereiche lassen sich auf das elektromagnetische Feld zurückführen, welches in das Werkstück eingebracht wird.

### 5.3.2 Versuchsreihe 2 – Verklebung von Stringern in der Ebene

In den nachfolgenden Versuchen wird ausschließlich die induktive Erwärmung Gegenstand der Versuchsreihen sein, da die Erwärmung mittels des Heizelementes lediglich dem Vergleich der konventionellen mit der alten Technologie dienen soll. Die eingestellten Parameter aus der ersten Versuchsreihe werden übertragen und gleichzeitig deren Reproduzierbarkeit überprüft. Bei abweichenden Temperaturen werden die Parameter neu angepasst.

Die Abbildung 46 zeigt im Folgenden die weitere Vorgehensweise sowie die Ziele für die Einstellung als auch Integration der induktiven Verklebung.



**Abbildung 46: Schritt 2 Vorverklebung**

In dem zweiten Schritt der Versuchsreihen werden mehrere Stringer auf einer ebenen Platte aus CFK induktiv vorverklebt und anschließend im Autoklaven vollständig verklebt und ausgehärtet. Hierbei wird der gesamte zweistufige Prozess durchgeführt.

Das Hauptaugenmerk liegt in der Anwendung und Handhabung der Stringergeometrie und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse aus dem ersten Versuch. Weiterhin erschweren die Komplexität des Vakuumaufbaus und die Integration der Stringerschläuche den

Verklebungsprozess. Der Vakuumaufbau bewirkt einen flächig gleichmäßigen Druck auf das Laminat (Kompaktierung des Laminats), stützt darüber hinaus die Stringer und verhindert ein Verrutschen dieser. Damit während des Autoklavprozesses der erforderliche Druck ebenfalls das Laminat im Profilinneren des Stringers erreicht, werden dort Schlauchkerne mit Zugang zum Autoklavdruck integriert. Weiterhin gewährleisten die Schläuche einen Druckausgleich zwischen dem Inneren und Äußeren des Stringers und verhindern somit druckbedingte Beschädigungen. Abbildung 47 veranschaulicht das Prinzip der Stringerschläuche. Dabei ist zu erwähnen, dass die in der Abbildung aufgezeigten Schläuche (tube cores) speziell für Airbus entwickelt wurden. Bei den für diese Arbeit verwendeten Schläuche handelt es sich um einfache Stringerschläuche.

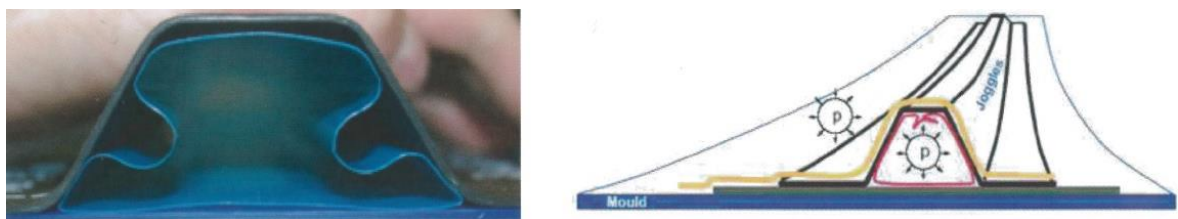


Abbildung 47: Querschnitt von Omega-Stringern mit integriertem Stringerschlauch [35]

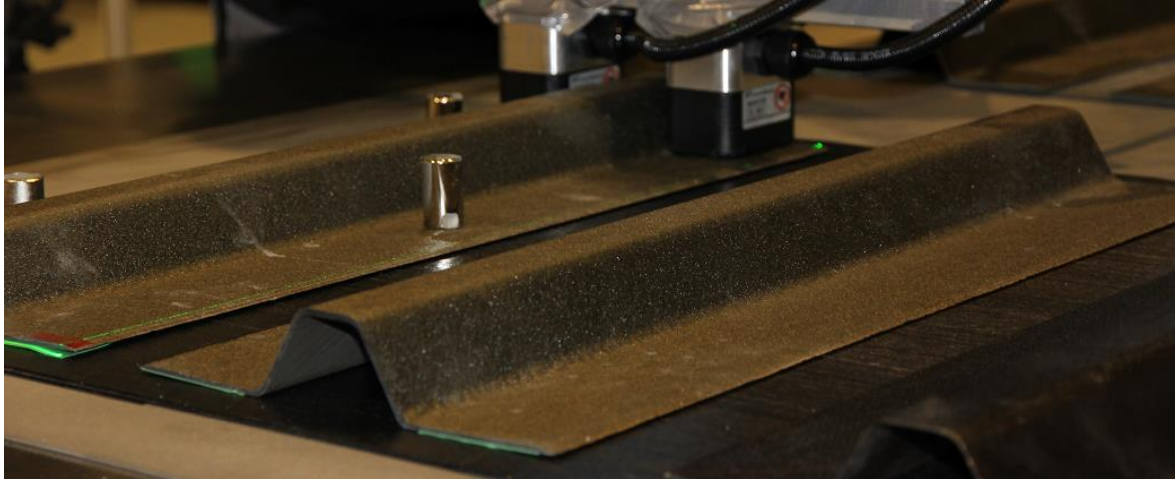
Um die beiden Füße des Stringers parallel verkleben zu können werden simultan zwei Induktionsköpfe verwendet, die, wie in Abbildung 4, miteinander verbunden sind. Der verwendete Generator ist für die Verwendung von zwei Köpfen ausgelegt.

Weiterhin wird in diesem Versuch erstmals als Positionierungshilfe die Laserprojektionsanlage angewendet. Hiermit lassen sich die zu verklebenden Bauteile anordnen. Vor allem der Umgang mit der Software und die Erstellung der Projektionsdaten sind von großer Bedeutung für den Hauptversuch. Es werden sowohl die CFK-Platten als auch die Stringer projiziert und danach ausgerichtet.

Als Werkzeug dient der Validierungstisch mit einer aufgelegten 4mm starken Stahlplatte (St51). Diese hat in Verbindung mit den verwendeten Parametern die erforderlichen Temperaturen erreicht. Auf der Platte werden die zwei CFK-Platten im ausgehärteten (für das Secondary Bonding Verfahren) und im unausgehärteten (für das Co Bonding Verfahren) Zustand nebeneinander abgelegt.

Um die Stringerablage zu vereinfachen wird der Klebefilm bereits vor der Verklebung auf die Klebefläche aufgetragen. Mit Hilfe einer Silikonheizmatte, welche bei 50°C voreingestellt ist, wird jedes Stringerelement für ca. 10 Sekunden auf die Heizmatte gedrückt und erwärmt, sodass der Klebefilm auf der Klebefläche haftet. Die Temperatur wird nach Erfahrungswerten des DLR gewählt und nochmals getestet. Das Ziel besteht lediglich darin, dem Klebefilm durch einen geringen Wärmeeintrag zu etwas Haftung zu verhelfen. Da die Körperwärme an den Handflächen nicht ausreichend ist, werden die Silikonheizmatten verwendet.

Im Anschluss darauf werden die Stringer anhand der Laserprojektion auf den CFK-Platten positioniert und mit Magneten fixiert. Die eingestellten Parameter aus dem ersten Versuch werden hierbei übernommen.



**Abbildung 48: Versuch 2 - Fixierung; induktive Verklebung** [\[38\]](#)

Da das Bauteil in diesem Versuch vollständig verklebt werden soll, bedarf es einem Vakuumaufbau für den Autoklavzyklus. Dieser wird nach dem Beispiel in Abbildung 13 aufgebaut. Des Weiteren muss die nasse (unausgehärtetes Material) CFK-Platte ebenfalls im Autoklaven ausgehärtet werden. Dafür kommt die zuvor erläuterte Schlauchkerntechnik zum Einsatz um druckbedingte Beschädigungen der Stringer zu vermeiden. Nach dem Integrieren der Stringerschläuche wird das Bauteil durch den Vakuumaufbau versiegelt und evakuiert.

Weiterhin wird das Bauteil in einer senkrechten Vorrichtung befestigt. Abbildung 49 zeigt diesen Aufbau im Autoklaven befindlich. Da sich die Versteifungselemente in der Rumpfschale in verschiedenen Neigungspositionen befinden soll auf diese Art und Weise ein Verrutschen während des Autoklavzyklusses überprüft werden. In der Zeit des Aushärtens besteht die Gefahr des sogenannten „*Schwimmens*“ der Stringer, da der Klebstoff als auch das Harz viskos werden. Nach Beendigung werden die Stringerelemente durch die Laserprojektion auf das Verrutschen überprüft.



Abbildung 49: Versuch 2 - senkrechter Vakuumaufbau [38]

### 5.3.3 Versuchsreihe 3 – Verklebung von Stringern in einem Full Scale Schalenausschnitt

Der dritte Schritt fasst alle bisher erlangten Erkenntnisse als direkten Vorversuch für den Full Scale Demonstrator zusammen. Der Versuch wird in dem Rumpfschalenwerkzeug der EU-Projekt Schalenform durchgeführt und bildet infolgedessen eine besondere Herausforderung. Hierfür werden exemplarisch zwei kleine Schalen, worin je fünf Stringer verklebt werden, gefertigt. Gleichmaßen, wie in den ersten beiden Versuchen, wird im Co-Bonding und im Secondary-Bonding Verfahren verklebt. Vor allem die Stringerpositionierung mittels der Laserprojektionsanlage, die Stringerbefestigung mittels Magneten sowie der Vakuumaufbau bilden aufgrund der Schalenform eine komplexe Aufgabenstellung und müssen für den Endversuch erprobt werden. Weiterhin ist die thermografische Überprüfung der erreichten Temperaturen von großer Bedeutung, da die Materialdicke des Rumpfschalenwerkzeugs einen Einfluss auf die Induktionsparameter hat. Die Werkzeugoberfläche besteht, ebenso wie die Stahlplatten aus den ersten Versuchen, aus St51 Baustahl und misst eine Dicke von 20mm. Unter Umständen müssen die vorher ermittelten Induktionsparameter dem Werkzeug angepasst werden.

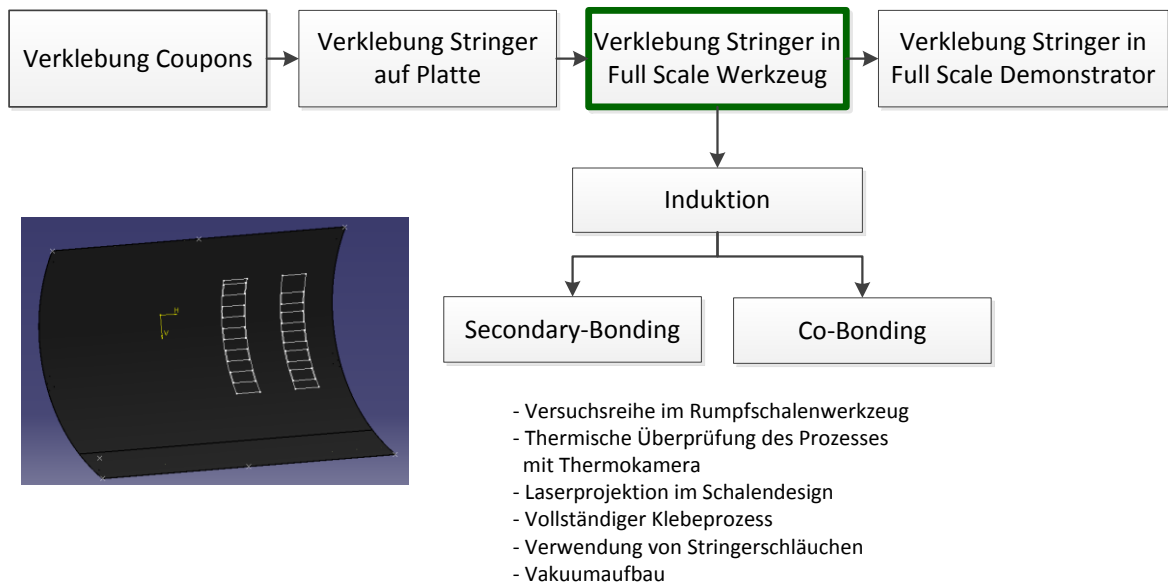
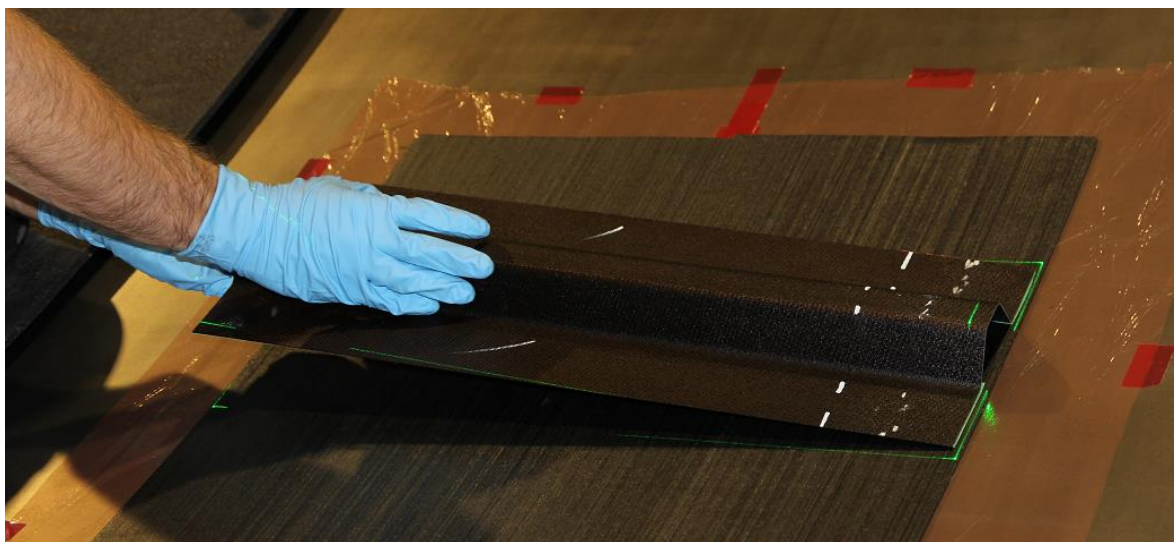


Abbildung 50: Schritt 3 Vorverklebung

Um die Vorverklebung der Versteifungselemente in der Rumpfschale zu erproben werden zunächst die gefertigten Rumpfschalen im kleinen Maßstab in dem Werkzeug platziert. Dabei werden eine ausgehärtete und eine unausgehärtete (nass) Schale positioniert und mittels Magneten fixiert.

Die vorgefertigten Stringerelemente werden wie in Abbildung 51 zu sehen mit Hilfe der Laserprojektion abgelegt und ebenfalls mit Magneten fixiert.

Abbildung 51: Versuch 3 - Stringerpositionierung in der Rumpfschale [\[38\]](#)

Nach dem Platzieren und Fixieren aller Stringerelemente werden sie, wie in Abbildung 52 zu sehen, induktiv vorverklebt. Dafür werden die ermittelten Einstellungen aus Kapitel [5.3.1](#) verwendet.



Nach der ersten Anwendung zeigt sich jedoch, dass die Geräteeinstellungen angepasst werden müssen, da die geforderten Temperaturen zwischen 55°C und 60°C nicht erreicht werden. Mit den Parametern aus den ersten beiden Versuchen wurden Temperaturen über 60°C detektiert. Aus diesem Grund werden an einem Probestück die Parametereinstellungen in dem Rumpfschalenwerkzeug wie folgt verändert und angepasst.

P in [kW]	3,375	3,75	4,125	4,5
t in [s]	2	2	2	2
T in [°C]	49,5	56,5	64,65	74,45

**Tabelle 6: Versuch 3 - Neueinstellung Parameter Secondary Bonding**

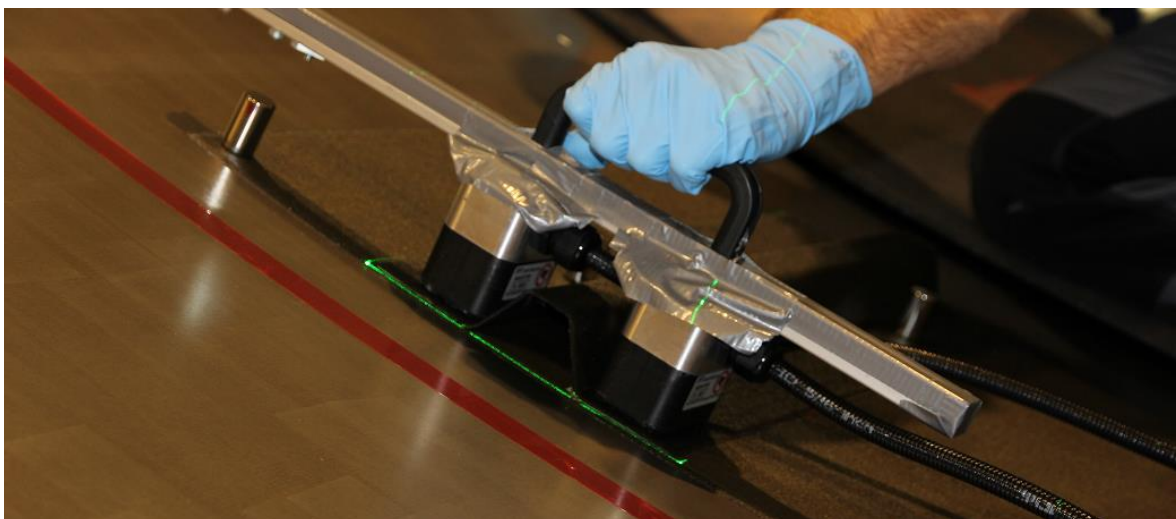
P in [kW]	3	3,375	3,75	4,125
t in [s]	2	2	2	2
T in [°C]	42,4	50,65	59,25	68,6

**Tabelle 7: Versuch 3 - Neueinstellung Parameter Co Bonding**

Die Anwendung auf einer neuen Werkzeugoberfläche hat gezeigt, dass die Integration der Induktionstechnologie in einen Prozess stets vom vorhandenen Werkzeug abhängig ist und keine allgemeinen Aussagen bzgl. der optimalen Parametereinstellung getroffen werden können.

Die Stringer haben bei diesem Versuch eine Länge von 550mm. Für die Fixierung werden sie jeweils an der Seite sowie in der Mitte durch die zwei Induktionsköpfe verklebt. Somit besteht die Vorverklebung aus sechs Klebepunkten. Die Anzahl der tatsächlich benötigten Klebpunkte gilt es jedoch noch zu erproben und richtet sich jeweils nach der Länge des zu verklebenden Elementes.

Bei den ersten Versuchen zu Testzwecken haben die Elemente bereits mit zwei Klebepunkten gehalten.



**Abbildung 52: Versuch 3 - Induktive Vorverklebung [38]**

Nach der Vorverklebung aller Elemente wird der Aufbau für den Autoklavzyklus vorbereitet. Wie schon in Kapitel [5.3.2](#) erwähnt, wird die Schlauchkerntechnik in den Vakuumaufbau integriert. Sie verhindern ein druckbedingtes Beschädigen der Stringerelemente. Abbildung 53 zeigt die Vorbereitungen für den Vakuumaufbau sowie die bereits vorverklebten Versteifungselemente. Die Stringerschläuche werden für den Aufbau in ihrer Länge angepasst und durch die Stringer geführt.

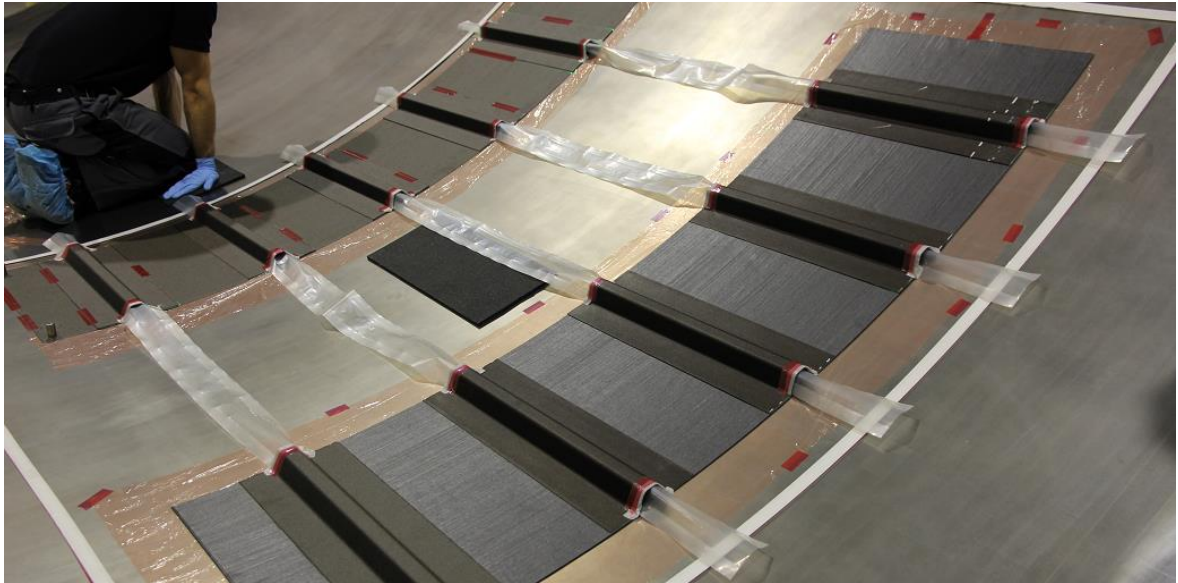


Abbildung 53: Versuch 3 – Schlauchkerntechnik [\[38\]](#)

Das Integrieren der Schläuche wird bei dem Validierungsversuch in Kapitel [6](#) nochmals genauer erläutert. Die weiterführenden Arbeiten beziehen sich auf einen standardisierten Vakuumaufbau. Hierfür werden Abreißgewebe und Vliesmatten, sogenannte Breather, über den gesamten Aufbau verteilt. Die beiden Schichten werden den Formen der Stringer angepasst, bevor die Vakuumfolie platziert und versiegelt wird.

Da dieser Versuch ebenso als ein Vorversuch für aktuelle und weiterführende EU Projekte als auch für die industrielle Analyse gesehen wird, wird der Aufbau nach den Airbusrichtlinien (LDS siehe Anhang) durchgeführt. Ein Ausdruck des durchgeführten Autoklavzyklus ist im Anhang der Arbeit zu finden.

Nach Beendigung des Aushärtezyklusses werden die zwei Schalen ebenfalls auf ein Schwimmen der Stringerelemente kontrolliert.

## 5.4 Ergebnisse und Auswertung der Versuche

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus den vorangegangenen Versuchen in tabellarischer und grafischer Form dargestellt und ausgewertet. Die Bewertung und Deutung der gewonnenen Erkenntnisse erfolgt in Kapitel [7](#).

### 5.4.1 Auswertung Versuch 1

Die Auswertung der ersten Versuchsreihe bezieht sich auf die Einstellung des Induktionsprozesses und dem Detektieren der verschiedenen Einflussfaktoren. Die Ergebnisse sollen die Dimensionen und Möglichkeiten, die durch den Induktionsprozess möglich sind, darstellen. Zusätzlich soll das Potential der Induktionstechnologie gezeigt werden, in dem die Versuche mit den Werten der konventionellen Erwärmungstechnologie verglichen werden. Durch die gesammelten Kenntnisse sollen Aussagen für künftige anwendungsspezifische Aufgaben getroffen werden.

Durch das Anwenden des Co Bonding Verfahrens als auch des Secondary Bonding Verfahrens werden zwei Prozesse verglichen, die Aufgrund ihrer Materialeigenschaften Einfluss auf die Temperaturentwicklung nehmen. Die zusätzlichen Versuche mit dem Heizelement sollen Parameter aus der konventionellen Fertigung repräsentieren.

Der Induktionsprozess wird durch drei variabel einstellbare Parameter beeinflusst. Dabei handelt es sich um die Prozesszeit  $t$ , die Systemleistung  $P$  sowie die Frequenz  $f$ . Um Aussagen über ihren Einfluss auf den Prozess treffen zu können werden je zwei Parameter konstant gehalten, währenddessen der dritte Parameter variiert wird.

In Abbildung 54 werden die Ergebnisse aufgezeigt, die bei dem Variieren der Prozesszeit sowie der Systemleistung aufgenommen wurden. Die Versuche beziehen sich auf das Secondary Bonding.

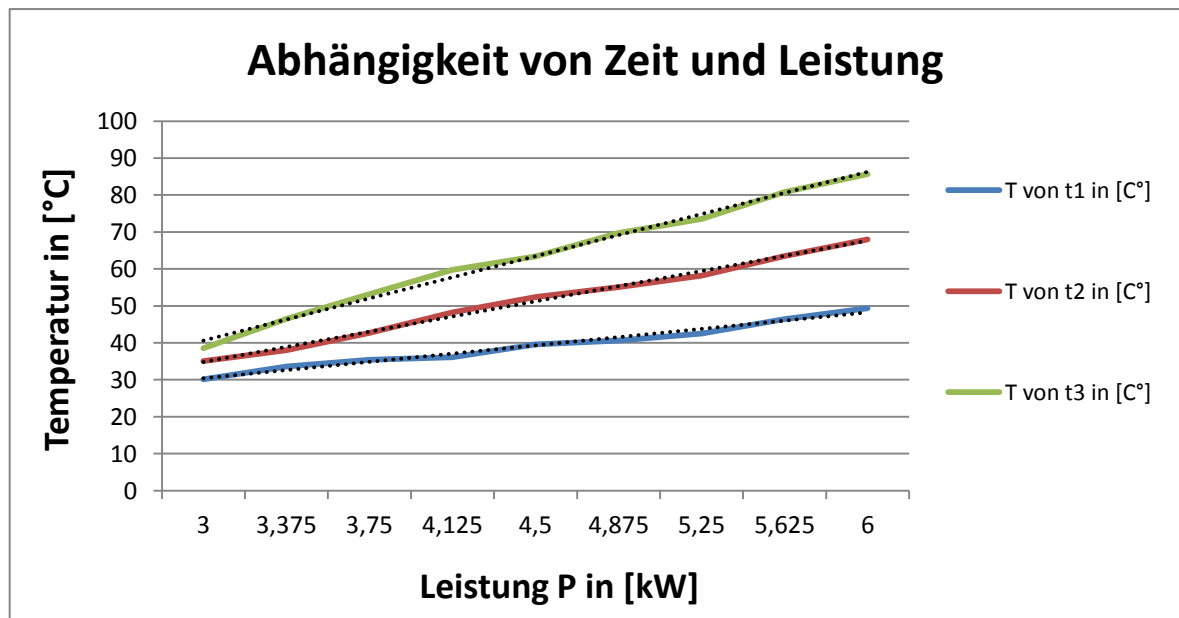


Abbildung 54: Induktion nach Zeit und Leistung

Die Temperatur stellt für alle Versuche das ausschlaggebende Ergebnis dar, da sie sich unmittelbar beim Variieren der Parameter verändert und für die Verklebung ausschlagge-



bend ist. In Abhängigkeit von der Zeit als auch von der Leistung kann beobachtet werden, dass die Temperatur bei dem Zunehmen beider Parameter steigt.

Somit kann gezeigt werden, dass mit steigender Prozesszeit die Temperatur steigt. Weiterhin geht aus dem Diagramm hervor, dass ebenso bei steigender Leistung die Temperatur anwächst.

Eine weitere Systemgröße ist Anregungsfrequenz. Sie beeinflusst im Wesentlichen die Ausprägung des elektromagnetischen Feldes in Bezug auf die Ankopplung und die Wirtiefe. [8] [51]

Zu dem Einfluss der Anregungsfrequenz hat unter anderem Michael Frauenhofer [51] Versuche durchgeführt. In seinem Experiment zeigt er, dass das Fasermaterial mit steigender Anregungsfrequenz stärker erwärmt werden kann. Jedoch muss dabei erwähnt werden, dass Frauenhofer die Versuche mittels unterschiedlicher Generatoren als auch Induktoren durchgeführt hat und sie somit nur bedingt vergleichbar sind. Weiterführende Untersuchungen wurden von R. Rudolf [52] durchgeführt. Rudolfs Untersuchungen konnten die Zusammenhänge von Frauenhofer bestätigen. Nach Auswertung der Theorien von Rudolf und Frauenhofer kann gesagt werden, dass die Erwärmung frequenzabhängig ist. Bei steigender Frequenz steigt proportional die Erwärmungsrate.

Diese Erkenntnisse gilt es zu untersuchen und zu berücksichtigen. Um die Temperaturentwicklung bei Veränderung der Frequenz zu erkennen, werden zwei Versuchsreihen mit jeweils konstant voreingestellter Leistung und Zeit durchgeführt. Abbildung 55 zeigt für diesen Versuch die gemessenen Temperaturen bei Einstellung verschiedener Frequenzen. Die Anlage wurde zunächst mit 3,75 kW betrieben, anschließend mit 5,25 kW bei einer Aktivierungszeit von zwei Sekunden.

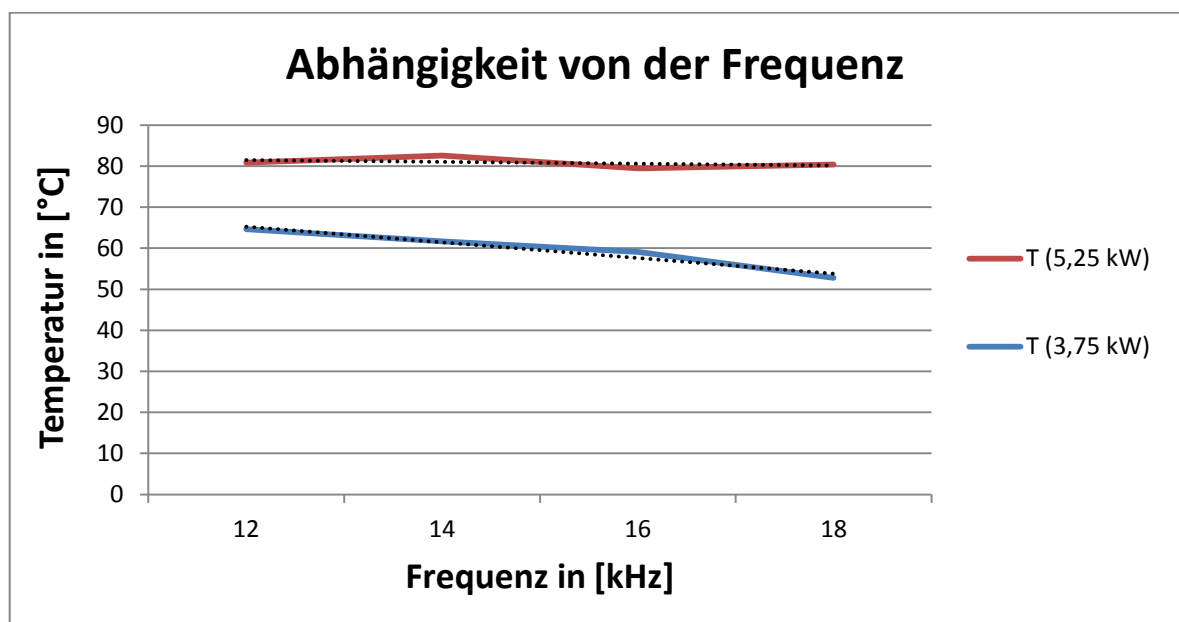


Abbildung 55: Induktion nach Frequenz

Die Graphen des Diagramms lassen erkennen, dass sich die Temperaturen bei der Versuchsreihe mit 5,25 kW Leistung nur unwesentlich verändern. Dementgegen fällt die Temperaturentwicklung bei der Leistungseinstellung von 3,75 kW auf. Bei steigender Frequenz nimmt die Temperatur ab.

Nach den aufgestellten Theorien von Frauenhofer und Rudolf wurden diesbezüglich andere Ergebnisse erwartet. Für seine Untersuchungen zur volumetrischen Erwärmung von Kohlenstofffaserhalbzeugen mittels der Induktionstechnologie untersuchte Tobias Ströhlein [33] ebenfalls den Einfluss der Anlagenfrequenz auf die Erwärmungsrate. Die mit diesem Versuch vergleichbaren Ergebnisse rechtfertigt er durch eine anderweitig genutzte Anlagentechnik.

Frauenhofer hingegen beantwortet die unterschiedliche Temperaturentwicklung mit den Wirkmechanismen. Der Erwärmungsmechanismus bei Kohlenstofffasern sei stark frequenzabhängig. Die Erwärmung kann über Joule'sche Verluste in Form von Leiterschleifen oder durch Kondensatoreffekte über die Knotenpunkte geschehen. Dadurch besteht das Risiko der lokalen Überhitzung.

Weiterhin muss beachtet werden, dass mit steigender Frequenz die Eindringtiefe reduziert wird. Bezogen auf den jeweiligen Anwendungsfall muss dafür die Frequenz angepasst werden, da der Erwärmungseffekt unter Umständen nicht die gewünschte Tiefe oder Schicht erreicht. Bei der Verwendung von hohen Frequenzen kommt es folglich zum sogenannten Skineffekt, der eine volumetrische Erwärmung des Materials nicht ermöglicht. Laut Frauenhofer [51] kann bei der Anwendung von niedrigen Frequenzen eine homogenere Erwärmung realisiert werden.

Nach der Untersuchung der einstellbaren Induktionsparameter interessieren verschiedene Faktoren, die den Induktionsprozess darüber hinaus beeinflussen können.

Da in den Versuchsreihen sowohl Prepreg-Material als auch ausgehärtetes Material verklebt wurde, geht es im Folgenden um den Einfluss dieser Materialien auf die Temperaturentwicklung. Durch die verschiedenen Zustände des Harzes ist es denkbar, dass sich hier eine Temperaturdifferenz entwickelt.

Der Versuchsaufbau wurde im Co- als auch Secondray Bonding Verfahren durchgeführt. Sowohl die Grundplatte aus ausgehärtetem CFK Material als auch die aus Prepreg – Material messen 2mm in der Dicke. Der Stringer misst an den zu verklebenden Stellen ebenfalls 2mm, sodass eine Gesamtdicke von 4mm erreicht wird. Da in den Vorversuchen der Induktionsprozess über eine Dauer von zwei Sekunden gute Ergebnisse gebracht hat werden an dieser Stelle lediglich die Temperaturen bei der Prozesszeit von zwei Sekunden verglichen. Die Systemleistung variiert dennoch zwischen den bekannten Werten.

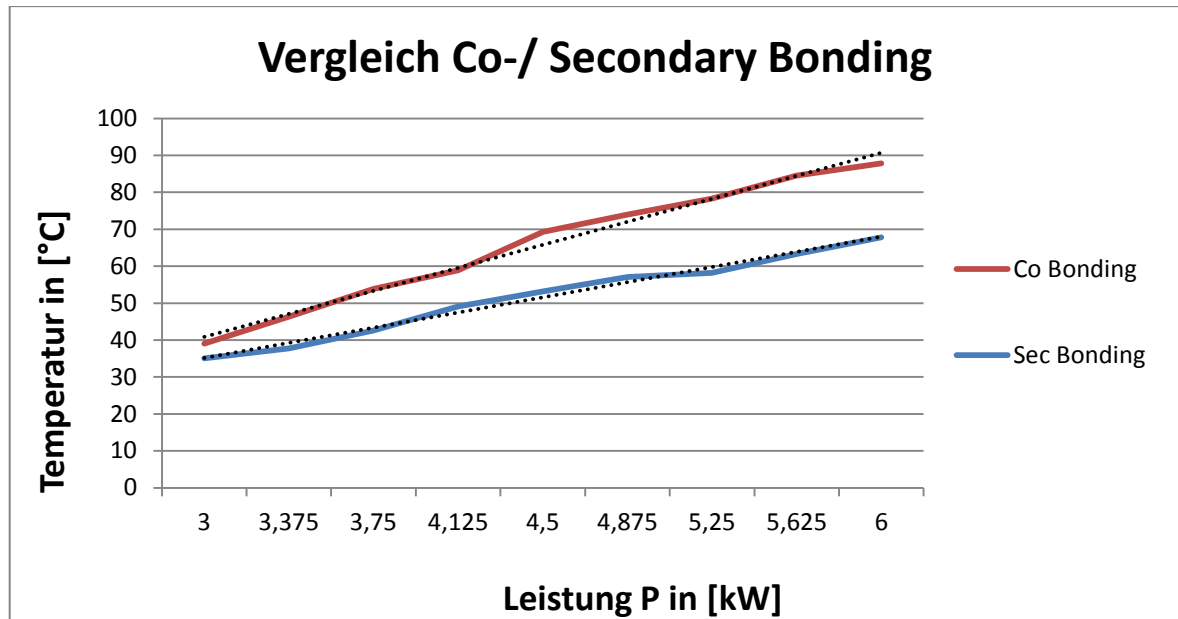


Abbildung 56: Vergleich Co-/ Secondary Bonding

Wie erwartet ist in Abbildung 56 eine Differenz der Temperaturentwicklung zwischen beiden Materialien zu erkennen. Dabei konnte der Aufbau mit dem Prepreg-Material stärker erwärmt werden, als der Aufbau mit dem ausgehärteten Material.

Es wird vermutet, dass aufgrund des nicht ausgehärteten Harzes ein höher elektrischer Leitwiderstand besteht und somit eine stärkere Erwärmung hervorgeht. Entsprechende Widerstands-Untersuchungen, um diese Theorie zu belegen, werden derzeit am DLR durchgeführt.

Um das Potential der Induktion gegenüber dem Prozess mit Heizelementen aufzuzeigen werden in folgender Abbildung 57 die Temperaturverläufe, gemessen über die Zeit, miteinander verglichen.

Der Versuchsaufbau beschränkt sich in diesem Fall auf das Fügen im Secondary Bonding Verfahren. Sowohl die Grundplatte als auch die Fügeflächen des Stringers messen jeweils 2 mm. Es werden zu Vergleichszwecken zwei Ausgangstemperaturen mit 55°C und 100°C definiert. Mit diesen werden die Heizelemente für eine vordefinierte Zeitspanne auf die Bauteile gelegt. Nach Informationen der Firma *FFT Produktionssystem GmbH & Co. KG* dürfen die Heizelemente eine maximale Temperatur von 55°C erreichen, da sie darüber hinaus das Fasermaterial beschädigen können. [\[21\]](#)

Die Vergleichswerte des Induktionsprozesses sind aus der bereits ausgewerteten Messreihe entnommen.

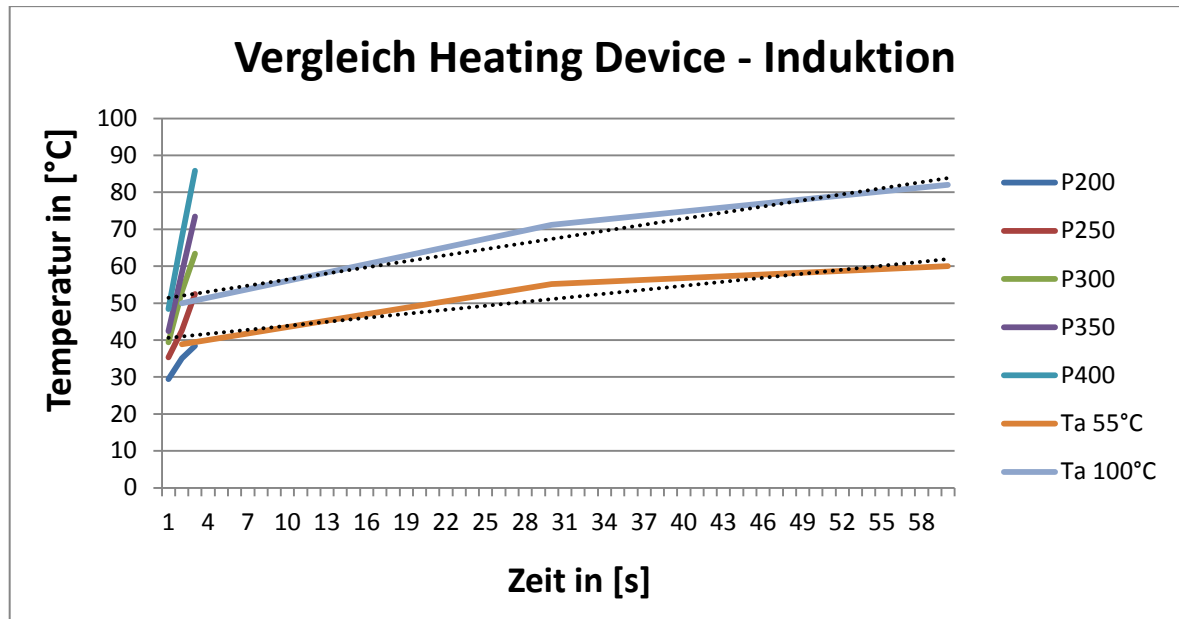


Abbildung 57: Vergleich zwischen Heizelement und Induktion

Abbildung 57 stellt sehr deutlich die unterschiedliche Temperaturentwicklung zwischen den beiden Prozesstechniken dar. Dabei ist das Potential der Induktionstechnologie eindeutig zu erkennen. Durch die Erwärmung mittels Induktion werden je nach Parameter-einstellung hohe Temperaturen erreicht, die mittels der Heizelemente erst nach einer halben bis einer Minute erreicht werden. Dazu muss gesagt werden, dass in dieser Versuchsreihe das Potential der induktiven Erwärmung nicht ausgereizt wurde. Die Parameter der Heizelemente jedoch dürfen aufgrund der temperaturbedingten Faserschädigung nicht weiter verändert werden.

Über die Repräsentativität des genutzten Heizelementes kann an dieser Stelle keine Aussage getroffen werden. Bzgl. der Dimensionen in Form von Leistung und Größe im Vergleich zu dem in der Industrie genutzten Anlage kann aufgrund fehlender Informationen keine Aussage getroffen werden. Vielmehr ging es in dem Versuch darum, die Auswirkungen der Prozesse miteinander zu vergleichen um das Potential der induktiven Erwärmung deutlich hervorzuheben.

#### 5.4.2 Auswertung Versuch 2

Der zweite Versuch der Prozesseinstellung zur induktiven Erwärmung diente der Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse aus Versuch 1. Weiterhin wurde der zweistufige Klebprozess erstmals komplett durchgeführt und alle dafür notwendigen Aufbauten mit in den Versuch integriert. Dafür wurde jeweils ein Aufbau im Secondary Bonding Verfahren und ein Aufbau im Co Bonding Verfahren durchgeführt.

Die Verwendung der Laserprojektionsanlage ermöglichte ein genaues Positionieren der Stringerelemente. Die induktive Verklebung wurde mit den Parametereinstellungen aus

Versuch 1 durchgeführt. Dabei wurden die ausgehärteten Bauteile mit einer Systemleistung von 4,875kW und die unausgehärteten Bauteile mit einer Leistung von 4,125kW über die Zeit von zwei Sekunden induktiv verklebt. Pro Aufbau wurden drei Stringer mit jeweils drei Klebepunkten verklebt. Abbildung 58 stellt die mit der Thermokamera gemessenen Temperaturdaten der jeweils neun Klebepunkte dar.

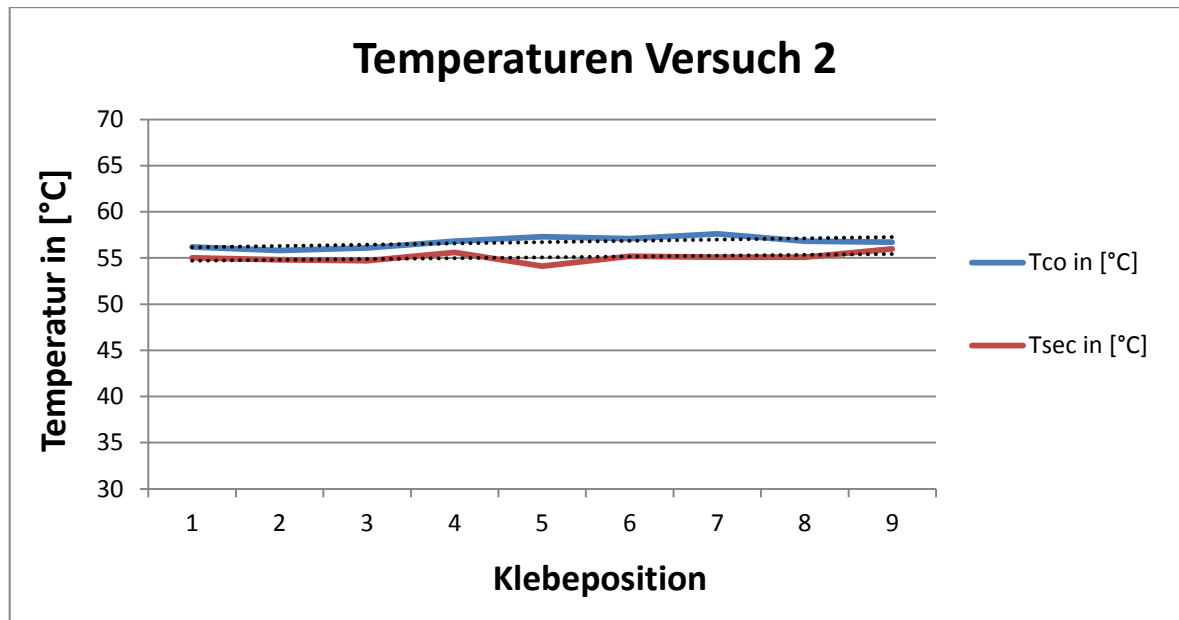


Abbildung 58: Temperaturen nach der induktiven Erwärmung (Versuch 2)

Die Auswertung ergibt einen relativ homogenen Temperaturverlauf. Die größte Temperaturdifferenz bei der Verklebung im Co Bonding (Tco) Verfahren beträgt 1,8K. Die größte Differenz beim Secondary Bonding (Tsec) nur 1,3K.

Durch diese relativ geringen Temperaturschwankungen lässt sich der Prozess als reproduzierbar darstellen. Die Ergebnisse können somit bei gleichen Randbedingungen wiederholt werden.

Mit dem anschließenden Vakuumaufbau sowie dem Autoklavzyklus wurden die Stringerelemente vollständig verklebt und das Prepreg-Material ausgehärtet. Die Bauteile wurden senkrecht im Autoklaven aufgestellt, wie bereits in Abbildung 49 dargestellt wurde, um ein mögliches Verschieben der Elemente zu detektieren. Die Kontrolle der Stringerpositionen verlief dabei positiv. Mittels einer erneuten Laserprojektion sowie einer Vermessung mit einem Flachlineal wurden die Positionen vermessen.

Alle Elemente haben ihre Position beibehalten und es konnte keine messbare Verschiebung nachgewiesen werden.

### 5.4.3 Auswertung Versuch 3

Die Auswertung der dritten Versuchsreihe soll die letzten Herausforderungen für den Hauptversuch lösen, um diesen routiniert durchführen zu können. Dieser Versuch wurde erstmals in der Rumpfschale durchgeführt, welche aufgrund ihrer komplexen Form einige Herausforderungen birgt.

Die Projektion der Stringergeometrien ergab einen wesentlich höheren Aufwand als in der Ebene. Abbildung 59 zeigt einen kompakten Überblick über die Erstellung der Projektionsdaten aus einer CAD Datei. Die CAD Daten wurden mit dem Programm Verisurf X7 3D Measurement Solution der Firma *Verisurf Software, Inc.* konvertiert.

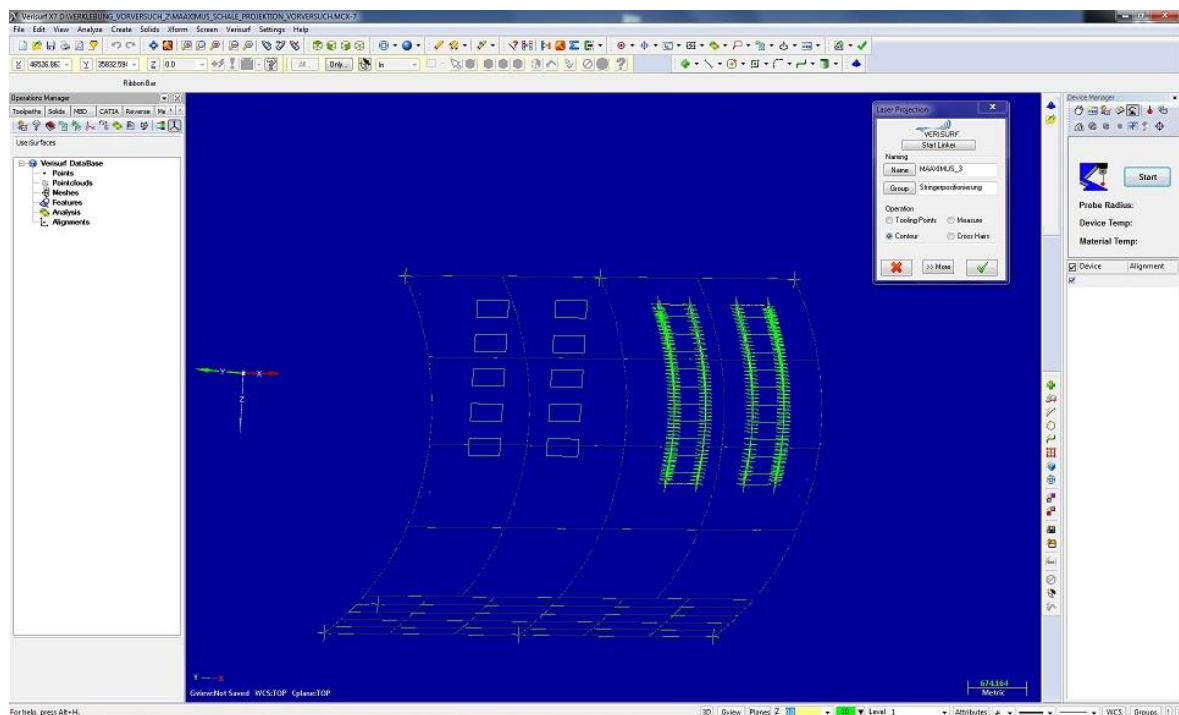


Abbildung 59: Laserprojektion von Stringergeometrien in der Rumpfschale

Bei dem Umgang mit den Bauteilen, dem Aufbau in der Rumpfschale und der Verklebung machte sich die fehlende Automatisierung bemerkbar. Neben den Rumpfschalen wurden Antirutschmatten befestigt, um die Stringer in den oberen Lagen erreichen zu können. Aus diesem Grund wird in dem Hauptversuch die Rumpfschale durch ein Gerüst und eine Überführung zugänglich gemacht. In der folgenden Abbildung 60 wird thermografisch ein Induktionsvorgang dargestellt. Darüber hinaus ist in dem Bildausschnitt das erschwerte Handling aufgrund der Schalenform zu erkennen. Bei Folgeversuchen und größeren Bauteilen ist diese Position nicht möglich, da so das Risiko besteht das Bauteil zu beschädigen.

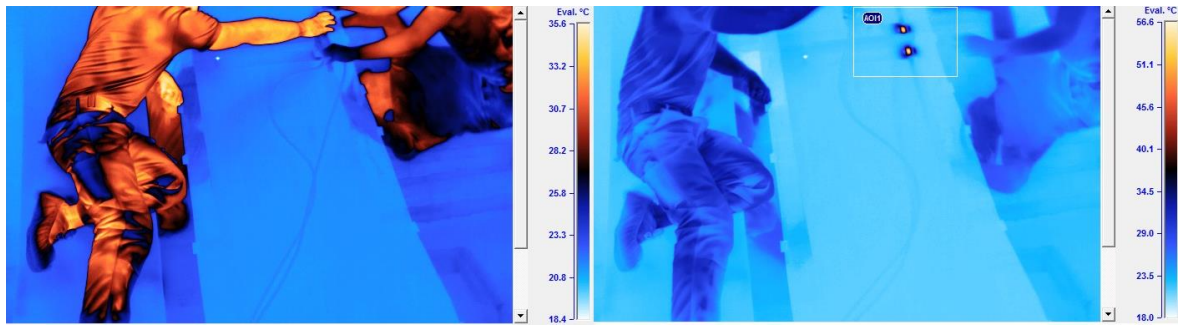


Abbildung 60: Induktive Verklebung in der Rumpfschale thermografisch dargestellt

Wie bereits in der Versuchsdurchführung in Kapitel [5.3.3](#) erwähnt wurden die Parameter durch die Benutzung der Rumpfschale geändert, da das dickere Stahlwerkzeug einen Einfluss auf die Induktion hat. Im Mittelwert ergaben die Temperaturmessungen der Klebepunkte einen Wert von 56°C. Die Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten gemessenen Wert liegt bei 1,8K. Somit kann gesagt werden, dass eine optimale und reproduzierbare Parametereinstellung gefunden wurde, die bei den weiterführenden Versuchen weiter angewendet werden kann.

Der anschließende Vakuumaufbau wurde nach der Airbus-Prozess-Anweisung (AIPI Airbus Process Instruction) [\[54\]](#) durchgeführt und geprüft. Hierbei muss der Vakuumaufbau bei der Prüfung einem maximalen Druckverlust von 66mbar in 2min standhalten. Erst danach wird er für den Autoklavzyklus freigegeben. Hintergrund der Prüfung ist die Sicherheit, dass der Vakuumaufbau während des Autoklavzyklusses nicht beschädigt wird und das Bauteil somit unter Umständen ausgeschlossen wird.

Nach dem Autoklavzyklus wurde ebenso wie im vorherigen Versuch die Verschiebung der Stringerelemente überprüft. Mittels der Laserprojektion und manueller Messungen konnten auch hier keine messbaren Deplatzierungen detektiert werden. Inwiefern die Größe und das geringe Gewicht der Stringerelemente eine Rolle spielt wird sich in dem folgenden Versuch zeigen. Die Stringerelemente messen dann mehrere Meter in der Länge.

## 5.5 Mechanische Analyse der Verklebung

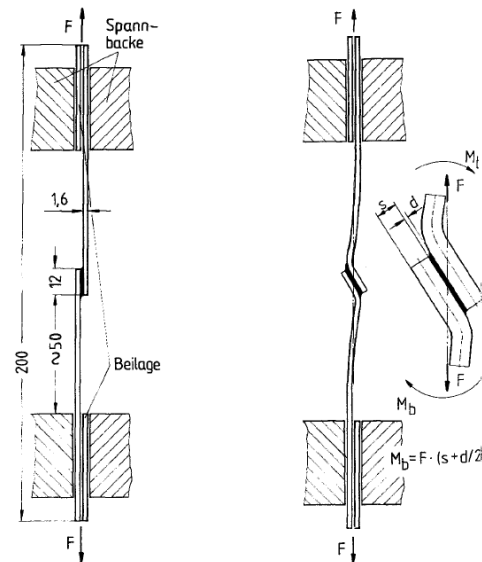
Beim Zugscherversuch nach DIN EN 1465 (siehe Anhang) wird die Scherfestigkeit der Klebeverbindung ermittelt. Darunter versteht man den Widerstand, den ein Festkörper den tangentialen Scherkräften entgegensetzen kann. Dabei ist das Verhältnis der aufgebrachten Höchstkraft zur Fläche der Ebene, auf die die Kraft einwirkt ausschlaggebend.

[\[37\]](#)

Für die Zugscherprüfung stand die „ProLine Tischprüfmaschine Z100“ der Zwick GmbH & Co. KG zur Verfügung. Normgerecht wurden die Probekörper bei einer Größe von 100 mm x 25 mm und einer Überlappungslänge von 12,5 mm geprüft. Mit einer Prüfgeschwindigkeit von 10mm/min werden die Probekörper der Belastung ausgesetzt. Mittels der Kraftmessdose „xforce k“, die ebenfalls von der Zwick GmbH stammt, werden die Kräfte aufgenommen. Der am Probekörper angebrachte Wegaufnehmer dient zur Ermittlung der



Dehnung. Die Prüfung erfolgt weggeregelt. Die Wegsteuerung wird durch die Prüfmaschine mittels des Traversenweges ermittelt. Dabei wird die entsprechende Spannungs-Dehnungs-Kurve, die zur Auswertung dient, aufgezeichnet. Abbildung 61 zeigt schematisch den Aufbau eines Zugscherversuches mit dem Probenkörper vor und während der Belastung.



**Abbildung 61: Schematischer Aufbau eines Zug-Scher-Versuches [36]**

Getestet wurden die verklebten Coupons aus dem ersten Versuch. Dabei soll eine Abhängigkeit zwischen den angewandten Parametern, der jeweils entstandenen Temperatur und der jeweils erreichten Scherfestigkeit entstehen. Ziel der mechanischen Untersuchung ist es, die thermischen Werte um mechanische Werten zu ergänzen. Durch diese Methode wird angestrebt, einen ungefähren Wert zu definieren, ab dem die Versteifungselemente als fixiert angesehen werden können.

Im Folgenden (Abbildung 62) sind die Versuchsergebnisse in Bezug zu den verwendeten Induktionsparametern grafisch dargestellt und folglich ausgewertet.



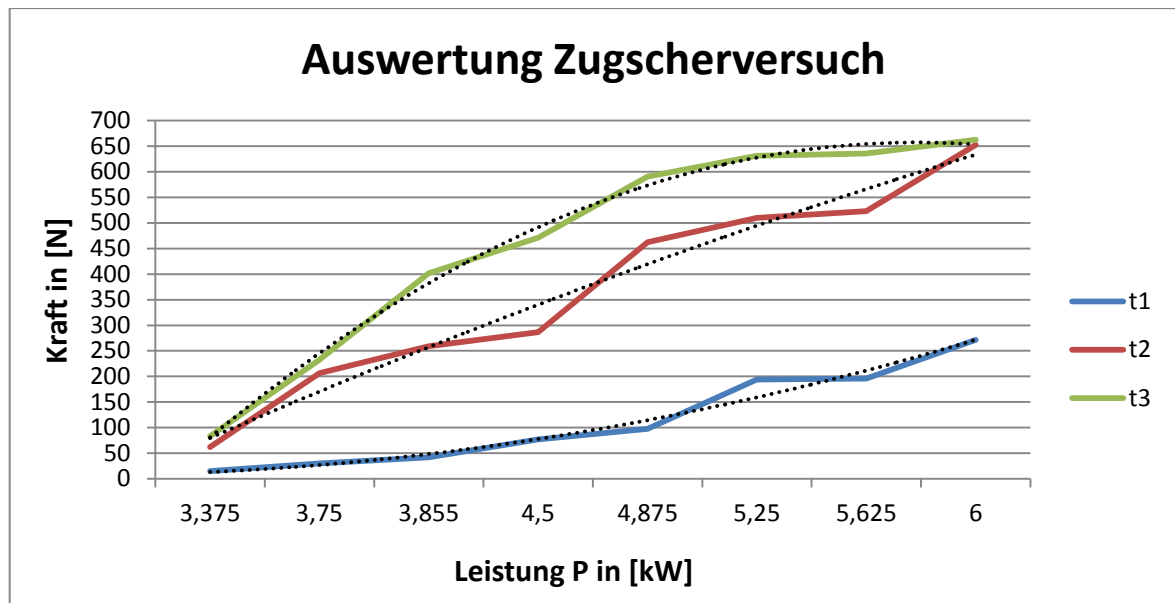


Abbildung 62: Zugscherversuch der induktiv verklebten Proben mit Bezug auf die Induktionsparameter, die für die Verklebung verwendet wurden

Abbildung 62 veranschaulicht die Ergebnisse der Zugscherversuche. Dabei werden in diesem Diagramm die Werte mit den jeweils angewandten Induktionsparametern in Verbindung gebracht. Dieser Versuch soll unterstützend für die Einstellung der Induktionsparameter wirken und darüber einen Wert über die Festigkeit der Stringerelemente liefern. Durch die graphische Darstellung von der benötigten Kraft zur angewandten Induktionsleistung wird gezeigt, wie sich die Klebeverbindung über die Temperaturentwicklung hinaus verändert. Nachfolgend soll durch die Leistung Rückschlüsse auf die Temperaturen geschlossen werden.

Zu erkennen ist jedoch sehr deutlich, dass die aufgebrachten Zugkräfte, die notwendig waren um die Klebeverbindung zu zerstören, mit steigender Leistung gestiegen sind. Gleichmaßen ist zu erkennen, dass die Zugkräfte durch eine längere Induktionszeit steigen.

Die folgende Tabelle 8 zeigt die Induktionsparameter, welche zu einer Temperatur von ca. 50°C führten und die Zugkraft, die für die jeweiligen Proben benötigt wurde, um die Klebeverbindung zu zerstören.

Probe (Zeit _ Leistung in %)	Kraft in [N]	Temperatur in [°C]
T1_40	271,63	49,4
T2_27	259,1	48,2
T3_25	233	53,2

Tabelle 8: Datenauswertung bei 50°C

Aus dem Vergleich lässt sich die Erkenntnis ziehen, dass die Einwirkzeit der Temperatur weniger relevant als die tatsächlich erreichte Temperatur ist. Alle der drei dargestellten

Proben haben eine ungefähre Temperatur von 50°C mit unterschiedlichen Induktionsparametern erreicht. Um die Klebeverbindungen zu zerstören wurden jedoch ähnliche Zugkräfte ermittelt. Für weiterführende Untersuchungen könnte man so die Klebeverbindungen für sehr kurze induktive Aufheizzeiten mit hohen Leistungen testen um die gesamte Prozesszeit nochmals zu verkürzen.

Weiterführend werden die Ergebnisse in Abbildung 63 in Bezug zu den gemessenen Temperaturen darstellt, da sich die Analyse des Prozesses hauptsächlich auf die thermografische Auswertung stützt. Anhand dieser Darstellung soll gezeigt werden, wie der Klebstoff mit zunehmender Temperatur seine Klebfestigkeit erhöht und es soll eine Wert definiert werden, bei dem die Klebverbindung als „fixiert“ betrachtet werden kann.

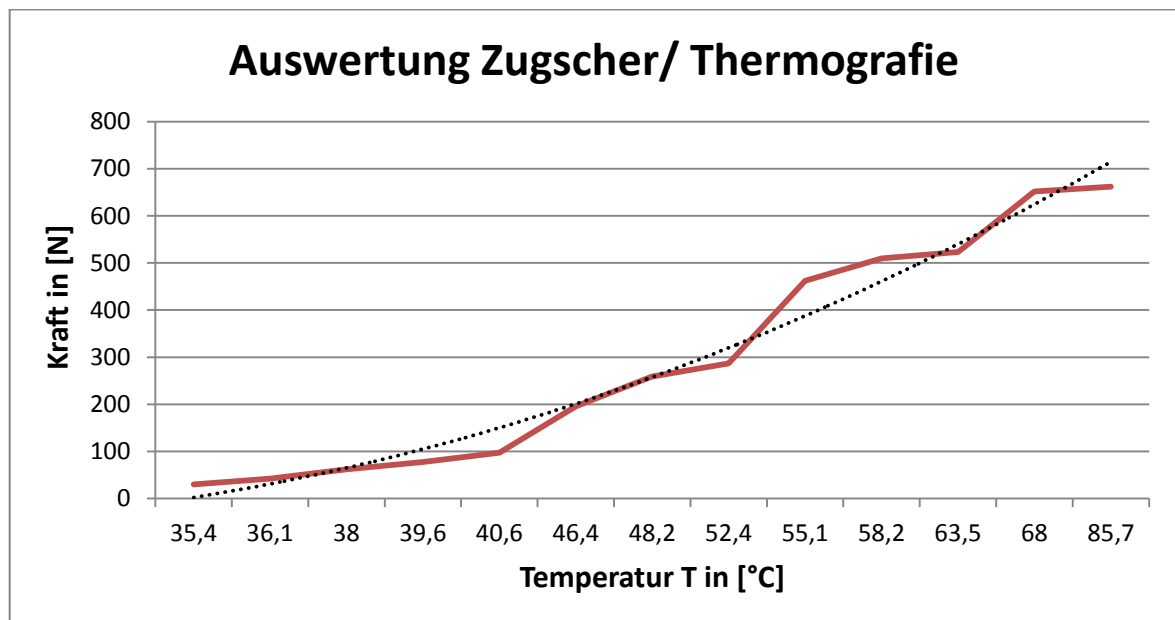


Abbildung 63: Zugscherversuch der induktiv verklebten Proben mit Bezug auf die Temperaturen, die bei der Verklebung gemessen wurden

Nach Angaben des Herstellers beginnt der Klebstoff zwischen 45°C und 50° zu schmelzen und seine Klebwirkung zu entwickeln. Auffällig in Abbildung 63 ist dabei, dass die benötigte Kraft bei dem Zugscherversuch zwischen 52°C und 55°C sehr stark ansteigt. Dadurch lässt sich der Rückschluss ziehen, dass bei einer Oberflächentemperatur von 55°C der Klebefilm anfängt zu schmelzen und die Bauteile miteinander verbindet. Zwischen den Bauteilen muss somit eine Temperatur zwischen 45°C und 50°C herrschen. Das bedeutet, dass für die weiterführenden Versuche mit den Induktionsparametern gearbeitet werden muss, mit denen mindestens diese Oberflächentemperatur erreicht wird.

Weiterhin wird diese Aussage durch die geprüften Zugscherproben in Abbildung 64 verstärkt, da man hier den temperaturbedingten Übergang von einem Kohäsionsbruch zu einem Adhäsionsbruch erkennen kann.

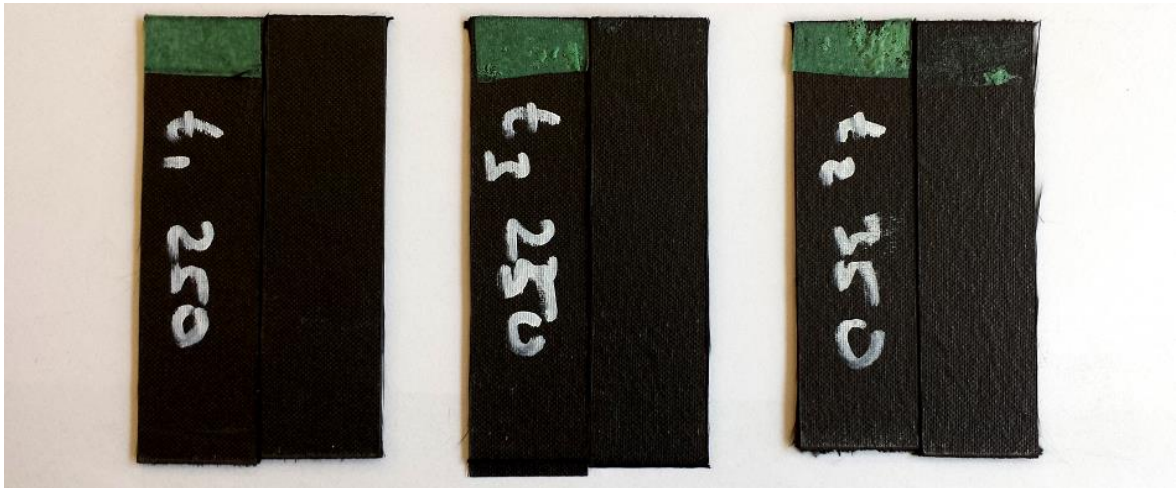


Abbildung 64: Zugscher-Proben nach der Prüfung

So wurden bei der Verklebung der linken Probe 35°C, bei der mittleren Probe 52°C und bei der rechten Probe 60°C auf der Oberfläche gemessen. Bei der linken Probe erkennt man ein rein adhäsives Versagen, da keinerlei Klebstoffrückstände auf dem Gegenstück zu sehen sind. Die mittlere Probe befindet sich im Übergang zu einem Kohäsionsbruch, da die Temperatur hier bereits bei 52°C liegt und man leichte Klebstoffrückstände auf dem Gegenstück erkennen kann. Bei der rechten Probe kann man deutlich sehen, dass der Klebstoff temperaturbedingt angefangen hat zu reagieren, da auf dem Gegenstück der Probe deutlich Klebstoffrückstände zu sehen sind.

Man kann also sagen, dass sich die Klebeverbindungen unter 55°C adhäsiv verhalten. Oberhalb von 55°C weisen sie sowohl ein kohäsives Verhalten als auch deutlich höhere Zugscherkräfte auf.

Abschließend wird eine kleine Charge getestet, bei denen die eingestellten Frequenzen von Klebung zu Klebung variieren. Hintergrund dieser Versuchsreihe ist die Theorie, die besagt, dass mit der Frequenz die Eindringtiefe des elektromagnetischen Feldes variiert werden kann. Bei einer niedrigen Frequenz müsste die Erwärmung mehr zur Oberfläche hin stattfinden und geringere Zugscherkräfte aufnehmen können. Hohe Frequenzen hingegen rufen tiefer eindringende Magnetfelder hervor und müssten somit höhere Zugscherkräfte aufnehmen können.

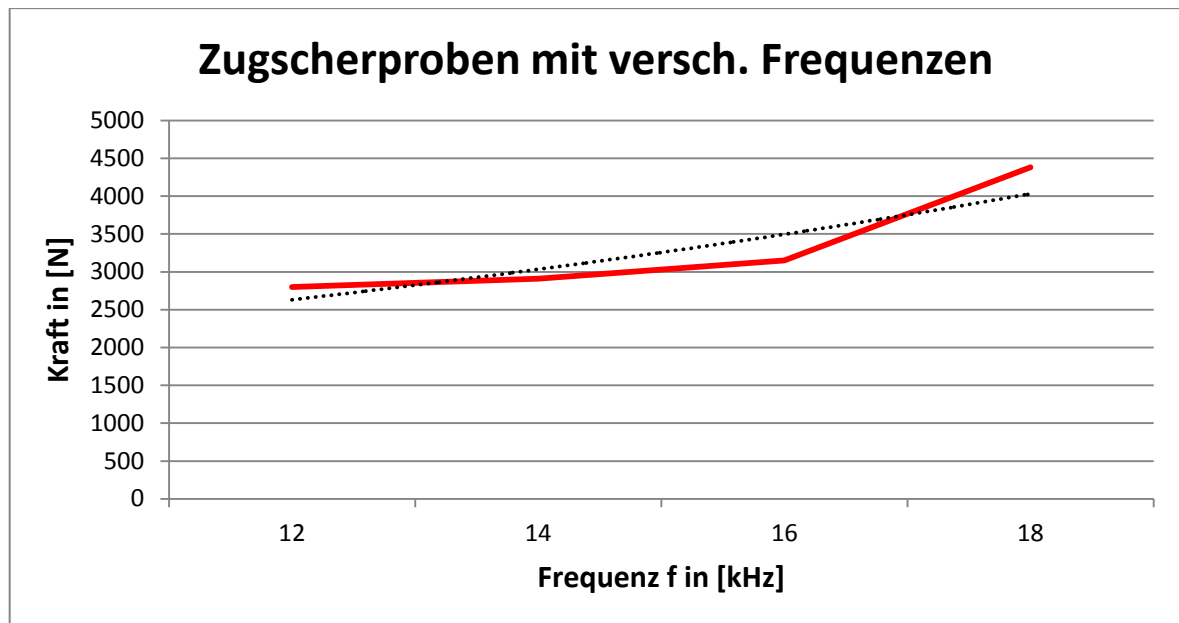


Abbildung 65: Zugscherproben nach Variation der Frequenz

Der getestete Frequenzbereich befindet sich aufgrund der generatorbedingten Begrenzung zwischen 12kHz und 18kHz. Die Auswertung der Proben bestätigt somit die Theorie der Eindringtiefe und der damit verbundenen Zugscherkräfte.

In Abbildung 65 ist deutlich zu erkennen, dass die benötigte Kraft mit der Frequenz steigt.

## 5.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wird der komplette Fertigungsschritt zur induktiven Vorverklebung der Versteifungselemente durchgeführt und untersucht. Primär geht es dabei um die Einstellung der Induktionsparameter für die Verklebung.

Der Prozess beginnt mit der Positionierung und Fixierung der Stringerelemente. Diese wird in den praktischen Versuchen durch die Verwendung einer Laserprojektionsanlage realisiert. Durch die Anbringung von Magneten werden die Elemente für die Verklebung fixiert.

Die anschließende Vorverklebung der Versteifungselemente wurde in drei Ebenen eingestellt. Das Ziel bestand darin, Schritt für Schritt die optimalen Induktionsparameter für die Vorverklebung der Versteifungselemente einzustellen. Als Referenzwert dafür gilt stets die erreichte Temperatur. Hierfür sind mindestens 45°C – 50°C zwischen den Bauteilen notwendig. Bei dieser Temperatur erreicht der Klebefilm eine Klebrigkeit, die die Bauteile beim Erkalten miteinander fixiert. Darüber hinaus wurden verschiedene Einflussgrößen detektiert, die für weiterführende Anwendungen der Induktionstechnologie von Bedeutung sind. Dabei werden sowohl die einstellbaren Induktionsparameter selbst variiert als auch Einflussgrößen, die durch bestimmte Randbedingungen der Fertigungsprozesse gegeben sind. So wird der Einfluss der berührungslosen Induktion untersucht, sodass zwischen

Bauteil und Induktor ein gewisser Abstand besteht. Weiterhin wird der Einfluss verschiedener Bauteildicken beobachtet, da die Wandstärken der Bauteile variieren können.

Durch die weitreichenden Vorversuche konnten die Induktionsparameter so eingestellt werden, dass innerhalb von zwei Sekunden eine Temperatur von ca. 55°C an der Oberfläche der Bauteile gemessen wird.

In dem weiteren Vorgehen wird die Reproduzierbarkeit untersucht und das Handling erprobt. Dabei geht es primär um die komplexe Form des Rumpfschalenwerkzeuges, welches durch die Laserprojektion angesteuert werden muss. Darüber hinaus muss das Bauteil durch einen Vakuumaufbau für den Aushärtezyklus in dem Autoklaven evakuiert und versiegelt werden.

Durch die Vorversuche wurden alle relevanten Einflussgrößen für den Hauptversuch und speziell diese Anwendung detektiert und bewertet. Die bis zu diesem Punkt erlangten Werte werden für den Hauptversuch übernommen.

Die Versuche wurden stets mit einer Thermokamera dokumentiert und deren Daten ausgewertet. Anhand dieser Daten wurden die Induktionsparameter festgelegt.

## 6 Validierungsversuch

Im Hauptversuch wird schließlich der Full Scale Demonstrator gebaut. Dieser Versuch wird ausschließlich im Secondary-Bonding Verfahren durchgeführt, da der Aufwand eine zweite Schale dieser Größenordnung anzufertigen enorm groß wäre und den zeitlichen sowie finanziellen Rahmen des Projektes überschreiten würde. Weiterhin wurden die Versuche im Co Bonding Verfahren lediglich für weiterführende Versuchszwecke und zum Vergleich mit in die Tests integriert.

Dieser Versuch stellt in mehreren Dimensionen eine große Herausforderung dar. So ergibt sich vor allem durch den komplexen Vakuumaufbau eine umfassende Aufgabenstellung. Der Aufbau muss über die gesamte Fläche der Rumpfschale und alle vorverklebten Stringerelemente versiegelt werden. Des Weiteren entsteht durch die umfangreiche Laserprojektion der zahlreichen Versteifungselemente sowie die Verklebung der einzelnen Elemente selbst, eine komplexe Herausforderung. Abbildung 66 zeigt grafisch die Details des Hauptversuches.



Abbildung 66: Schritt 4 Vorverklebung

Die Installation der Thermokamera und ihres Equipments stellt bei jedem Versuch eine hohen Aufwand dar, da das System stets aufgebaut, neu eingestellt und kalibriert werden muss. Da für den Hauptversuch knapp 50 Stringerelemente verklebt werden, werden die induktiven Verklebungen nur stichprobenartig mittels der Thermokamera untersucht. Für eine schnelle Überprüfung wird eine handliche Thermokamera eingesetzt, bei der anhand der Livebilder die Temperatur abgelesen und überprüft werden kann.

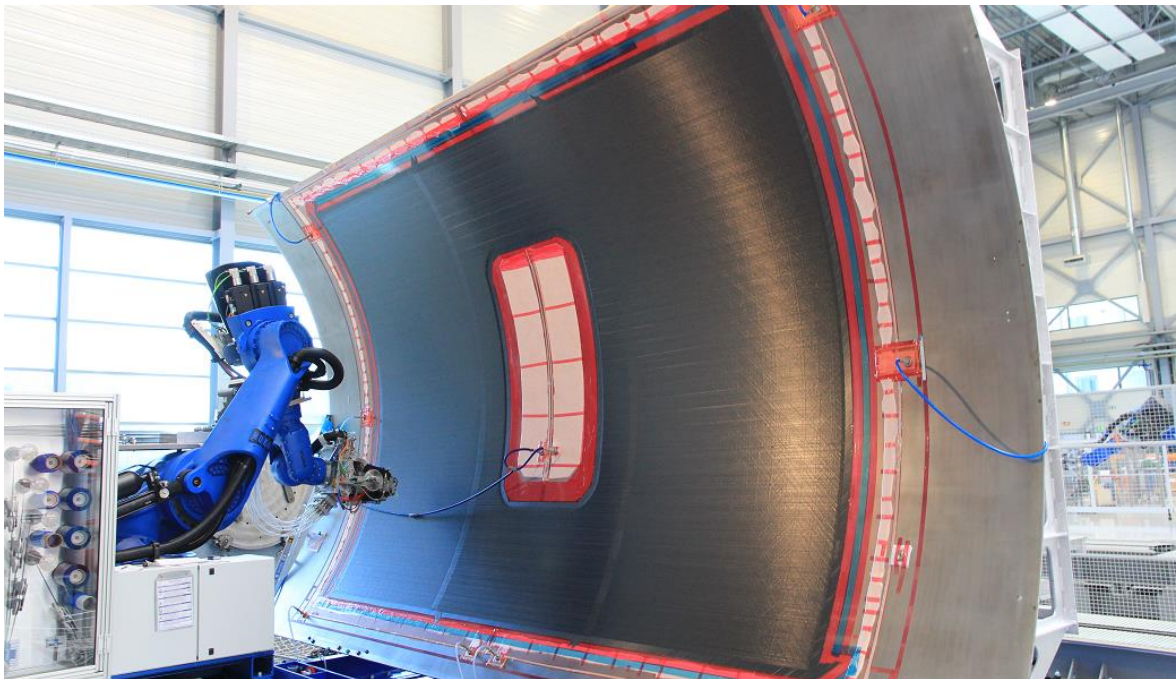
### 6.1 Bauteilfertigung Demonstrator Rumpftonne {GroFi}

Die Rumpfschale für das EU-Projekt wird im Fiberplacement Verfahren mit der GroFi-Anlage am DLR Stade gefertigt.



Durch das Verfahren werden Bauteile als Preform vollautomatisch und reproduzierbar hergestellt. Die Preformtechnologie ermöglicht dabei sowohl das Formen der gewünschten Bauteilkontur als auch das Realisieren der eingestellten Faserorientierung.

Der Prozess bedient sich konventioneller Industrieroboter, die mittels eines montierten Faserablegekopfes das Formwerkzeug bedienen. Dabei durchlaufen die sogenannten Prepreg-tows (mit Harz vorimprägnierte schmale CFK-Stränge/ Bändchen) durch Schlauchleitungen den Legekopf. Durch eine werkstoffspezifische Temperierung erlangt das Harz-Faser-Material eine Klebrigkeit (Tack), die die Ablage der ersten Lage auf dem Werkzeug vereinfacht. Über eine Rollenvorrichtung an dem Legekopf wird das Material auf die Werkzeugoberfläche gepresst und abgelegt. Der Prozess wird in Abbildung 67 dargestellt.



**Abbildung 67: Fertigung der Rumpfschale im Fiberplacement-Verfahren**

Die Formgebung für die Rumpfschale wird durch eine konvexe Negativform realisiert. Auf dieser werden die Prepreg-tows in computergesteuerten Bahnen nach einem einprogrammierten Muster abgelegt. Die Bändchen werden parallel in mehreren Bahnen nebeneinander abgelegt. Um die Steifigkeit zu erhöhen, wechselt dabei nach jeder Lage die Faserorientierung. Die Materialdicke von 8mm wird folglich durch das vielfache Ablegen von insgesamt 32 Einzelschichten erreicht. Das in den Kopf integrierte Schneidsystem konfektioniert die Faserbändchen gezielt bei der voreingestellten Länge und vermeidet somit unnötige Faserabfälle durch Verschnitt des Materials.

Besonders zu erwähnen ist, dass komplexe Bauteilgeometrien, die Krümmungen oder Radien erfordern, durch die AFP-Technologie realisiert werden können. Aufgrund der hohen Präzision, mit der die Roboter in diesem Verfahren arbeiten, wird eine hohe Bauteil-



qualität ermöglicht. Somit können spätere Lufteinschlüsse, durch ungewollte Überlappungen oder Spalten vermieden werden.

Nach dem Ablegeprozess wird die Rumpfschale in dem Autoklaven des DLR Stade ausgehärtet. Dabei erfolgt die Vernetzungsreaktion der Kunststoffmatrix. Das AFP-Verfahren ermöglicht hier eine sehr hohe Flexibilität und ein endkonturnahes Preforming, wie es für die Rumpfschale erforderlich ist. Sie wurde mit einem Türausschnitt und verschiedenen Wandstärken innerhalb des Bauteils gefertigt. Mit einer finalen Größe von 6x9m und einem Radius von 14m ist die Schale für die weiteren Prozessschritte freigegeben. [\[38\]](#) [\[12\]](#) [\[50\]](#)

## 6.2 Verklebung der Versteifungselemente

Die umfangreichen Vorversuche zur induktiven Stringerverklebung haben einen Prozess mit reproduzierbaren Ergebnissen erschaffen. Es wird weiterhin mit einer Leistung von 3,75kW bei einer Zeit von zwei Sekunden verklebt.

### 6.2.1 Detektierung der Stringerposition

Ebenso wie in den Vorversuchen werden die Positionen der Elemente mittels Laserprojektion ermittelt. Die Kalibrierung des Lasers erfolgt durch sechs an der Rumpfschale angebrachte Targets. Diese werden manuell mit dem Laser angesteuert und eingescannt. Anhand der Targets wird das Koordinatensystem im Computer ausgerichtet und die Stringerelemente dementsprechend projiziert. Die CAD-Datei des Bauteils wurde vorher in die LPT Firmensoftware implementiert. Sie umfasst die Werkzeugoberfläche, die Rumpfschale, die Stringer und die Targets.

Vor allem bei der hohen Anzahl an zu verklebenden Elementen stellt sich die Laserprojektion nicht nur als präzises Messmittel dar, sondern wirkt in dem Prozess als zeitlich effizient. Die anzuzeigenden Elemente werden automatisch oder auf Knopfdruck angezeigt und gewechselt. Es sind keine weiteren Messungen oder Kalibrierungen notwendig. In Abbildung 68 ist die Verwendung einer Stringerschablone und einer Laserprojektion zu sehen. Da der Prozess erstmals in dieser Dimension durchgeführt wird, werden unterstützend für die Laserprojektion die Schablonen als Messmittel aufgelegt.

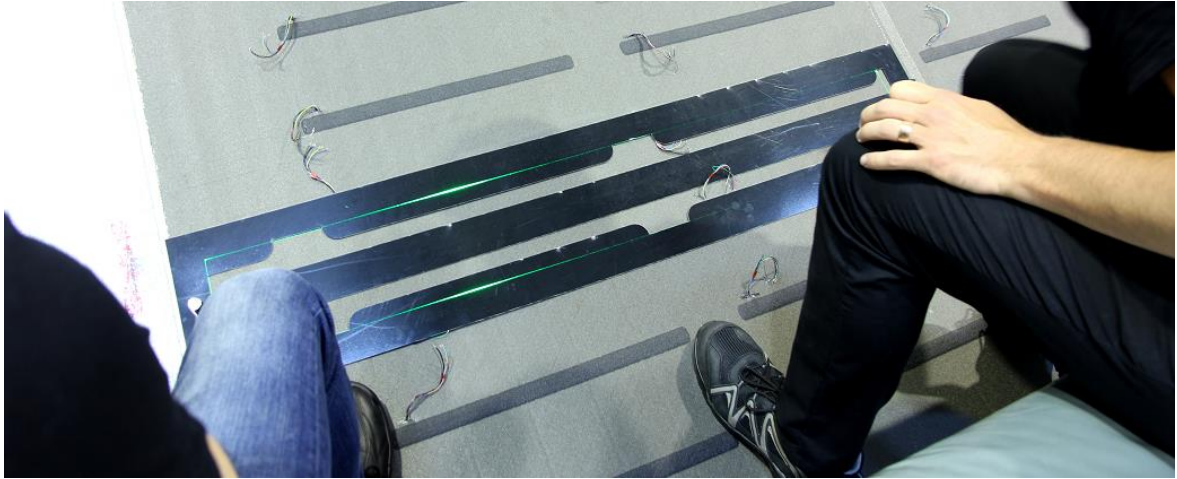


Abbildung 68: Versuch 4 - Laserprojektion Stringerelement [38]

### 6.2.2 Positionierung und Fixierung von Versteifungselementen

Vor dem Verbinden der Stringer mit der Schale wird der Klebefilm auf die Stringerfüße aufgebracht, damit dieser beim Positionieren nicht verrutschen kann. Der zuvor auf die passende Größe dimensionierte Klebstoff wird mit Hilfe einer Silikonheizmatte erwärmt und zum Haften gebracht. Die Matte ist auf 50°C voreingestellt. Mit dieser Temperatur wird der Klebstoff so erwärmt, dass er eine gewisse Klebrigkeit erlangt und an den Klebeflächen haften bleibt. Nach dem Auftragen des Klebstoffes werden die Elemente, wie in Abbildung 69 zu sehen, für ca. 10 Sekunden auf die Matte gedrückt. Anschließend kann der Stringer in der Schale positioniert und verklebt werden.



Abbildung 69: Auftrag des Klebefilms auf die Klebeflächen des Stringers [38]

Da die Schale eine Größe von 6x9m aufweist ist die Zugänglichkeit erschwert. Für das Fügen und Ausrichten der Stringer in dem mittleren Bereich wird aus diesem Grund eine Arbeitsbühne installiert, die es erlaubt, jede Position der Schale bedienen zu können ohne diese zu betreten. Weiterhin wird die Induktionsanlage um zwei Verlängerungskabel für

die Induktionsköpfe erweitert um problemlos in der Schale arbeiten zu können. Die Kabel für die Induktionsköpfe messen nun 6m.

Die Versteifungselemente werden nun anhand der Laserprojektion ausgerichtet. Diese zeigt nach und nach jeden einzelnen Stringer an. Nach dem Positionieren werden sie mit Magneten befestigt.

### 6.2.3 Induktionsverklebung

Im direkten Anschluss werden die Stringer induktiv verklebt. Die Magneten verbleiben währenddessen noch auf dem vorverklebten Stringer um eine gewisse Anpresskraft auf die Klebeflächen zu gewährleisten, bis der Klebstoff wieder abgekühlt ist. In Abbildung 70 sind die fertig vorverklebten Stringerelemente und ein Teil der Arbeitsbühne zu sehen.

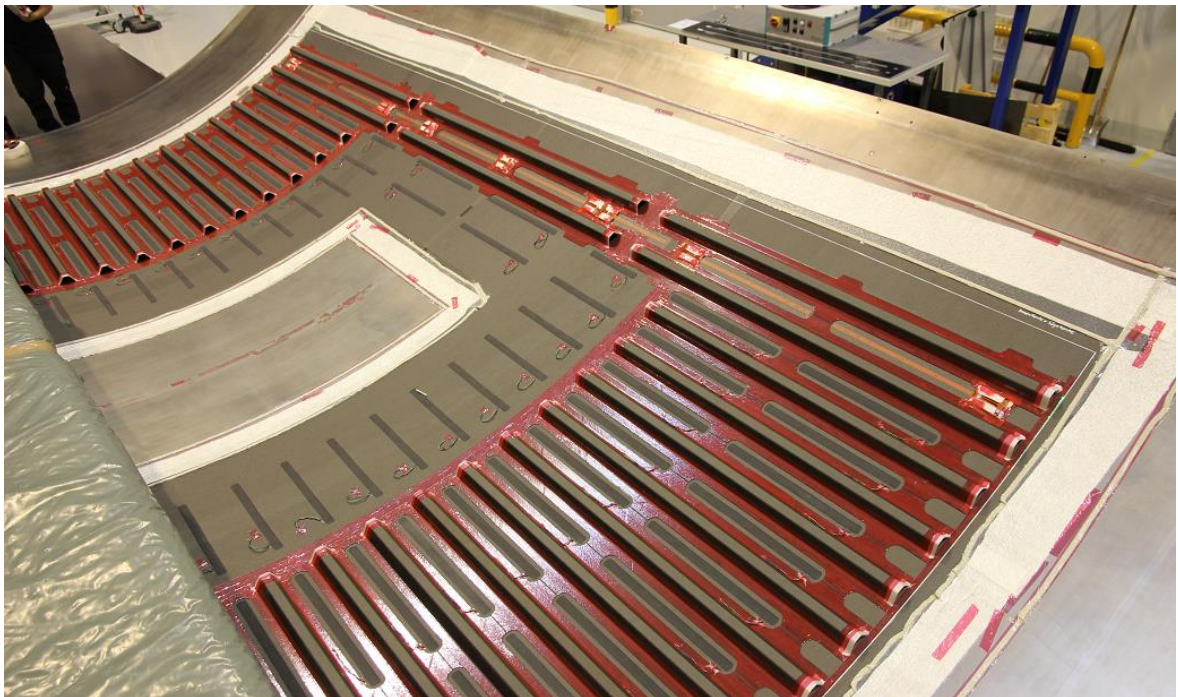


Abbildung 70: Induktiv vorverklebte Versteifungselemente in der Rumpfschale [38]

Für den zweiten Prozessabschnitt, die vollständige Verklebung im Autoklaven, müssen die Elemente durch einen Vakuumaufbau evakuiert werden. Der Aufbau gestaltet sich aufgrund der Bauteilgröße und seiner Komplexität als besonders aufwendig. Weiterhin müssen die Stringer mit den Stringerschläuchen versehen werden und diese wiederum in den Vakuumaufbau integriert werden. Dafür werden 20 Schläuche auf etwas über 9m dimensioniert und durch die einzelnen Stringerreihen gezogen. Hier ist es besonders wichtig darauf zu achten, die scharfen Kanten mit Abreißgewebe zu versehen, damit die Schläuche nicht beschädigt werden. Der Vakuumaufbau wird gleichermaßen wie in Versuch 3 aufgebaut. Die größte Herausforderung besteht darin, den Aufbau durch seine



vielen potentialen Fehlerstellen dicht zu bekommen. Nach der Fertigstellung des Aufbaus wird das Bauteil ausgehärtet.

### 6.3 Ergebnisse und Interpretation

Die stufenweise Entwicklung und Anpassung des Induktionsprozesses ermöglichte es den full scale Demonstrator im Hauptversuch plangemäß zu fertigen. Die umfangreichen Vorversuche schafften die Voraussetzung zur Einstellung optimaler Parameter für die Vorverklebung. Darüber hinaus konnten die Informationen über das Aufheizverhalten unter bestimmten Einflussfaktoren mit in den Hauptversuch einfließen. Die verwendeten Parametereinstellungen erlauben dem Prozess eine effiziente Arbeitsweise und die Möglichkeit der Weiterentwicklung. Mit den eingestellten Parametern konnten durchgehend die benötigten Temperaturen erzielt werden, sodass jeder Stringer nach der induktiven Vorverklebung handfest fixiert war.

Durch die Verwendung von zwei Induktionsköpfen war es möglich, die Stringerfüße parallel zu verkleben und den Vorgang zeitlich effizient zu gestalten.

Da keine Möglichkeit der automatisierten und computergesteuerten Positionierung der Versteifungselemente bestand wurde mit dem manuellen Platzieren anhand der Laserprojektion eine optimale Lösung gefunden.

Durch die Einrichtung einer Arbeitsbühne konnte eine optimale Bedienung und Zugänglichkeit der Schale realisiert werden.

Abbildung 71 zeigt die vollständig ausgehärtete Rumpfschale nach dem Autoklavzyklus. In der weiteren Verwendung wird die Schale durch einen externen Partner besäumt und durch ein weiteres Institut auf deren mechanische Kennwerte geprüft.



Abbildung 71: Vollständig verklebte Rumpfschale [\[38\]](#)

Zusätzlich zu der Vermessung mittels Laserprojektion wurde die Positionierung der Verstärkungselemente nach dem Autoklavzyklus mit den Abstandsmessern überprüft. Der Vakuumaufbau wirkt unterstützend gegen das Verschieben der Stringerelemente, dass während des Autoklavzyklusses geschehen kann. Der Klebstoff nimmt während des Prozesses einen flüssigen Aggregatzustand an, welcher die Elemente zum „Schwimmen“ anregen kann. Die Prüfung, die in Abbildung 72 zu sehen ist steht stellvertretend für einen Großteil der Stringerelemente, die sich beim Aushärten verschoben haben. Welches Ausmaß diese Problematik einnimmt kann an dieser Stelle nicht beziffert werden, da die Toleranzen für die erlaubte Deplatzierung zu diesem Zeitpunkt nicht bekannt sind. Die Verschiebung bezieht sich auf 0,1mm bis hin zu 1,5mm pro Element.

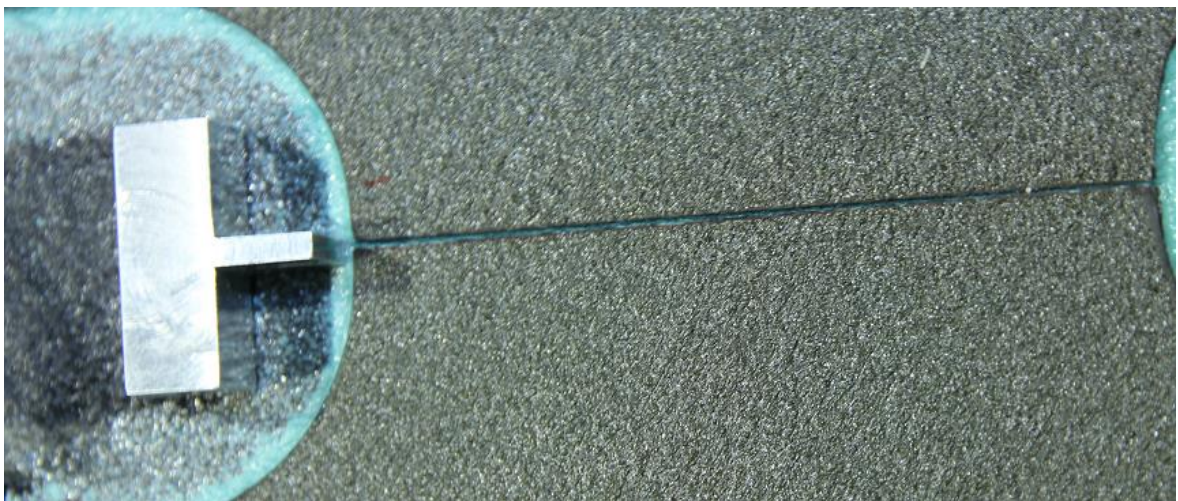


Abbildung 72: Überprüfung der Stringerposition nach dem Autoklavzyklus [\[38\]](#)

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

### 7.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit baut auf dem Thema der Leichtbauproduktion in der Luftfahrt auf. Dabei sollen die Verkehrsmittel effizienter gestaltet werden, indem unter anderem eine Senkung des Gewichtes realisiert wird. Dafür werden Flugzeugsegmente aus leichtem kohlefaserverstärktem Kunststoff gefertigt. Die Verarbeitung sowie die Anbindung der neuen Bauteile stellt dabei eine Herausforderung dar und wird derzeit auf konventionellem Wege per Hand und einfacher Technik ausgeführt. Die vorliegende Arbeit analysiert das Problem der Verbindung zweier Bauteile aus CFK, welches vorerst durch Nieten, später durch Kleben realisiert wurde. Die Verarbeitungsgeschwindigkeit hemmt den Prozess. Diese Problematik gilt es durch eine fortschrittlichere Technik zu verbessern.

Hierzu wurden mehrere aktuell eingesetzte Technologien verschiedener Unternehmen analysiert und teilweise mit in die Versuche integriert. Die vorgestellten Verfahren arbeiten mittels Wärmeleitung und Konvektionen. Realisiert werden diese Verfahren durch die Anwendung von Heizelementen oder Infrarotstrahlern.

Das Ziel dieser Arbeit bestand darin, zu zeigen, dass die Induktionstechnologie eine mögliche effizienzsteigernde Option bei dem Prozess der Verklebung von Bauteilen aus CFK darstellt. Dabei ist es gelungen, den Prozess soweit einzustellen, dass damit auf qualitativ hochwertiger Weise Versteifungselemente in einem Full Scale Demonstrator einer Flugzeug-Rumpfschale verklebt werden konnten. Die benötigte Prozesszeit lag dabei deutlich unter der aktuellen und hat damit auch die Effizienzsteigerung bewiesen. Die vorher analysierten Verfahren benötigen für den gleichen Prozess eine mindestens 10-mal so lange Zeit. Mit den in dieser Arbeit entwickelten Prozesseinstellungen ist es möglich, die Bauteile bei mindestens gleichwertiger Qualität miteinander zu verbinden.

Der wesentliche Vorteil der Induktionserwärmung in diesem Verfahren liegt darin, dass die Wärme unmittelbar im Werkstück erzeugt wird. Der Induktor leitet Wirbelströme in das Material ab. Durch den entstehenden Leiterwiderstand kommt es zur Wärmeentwicklung. Zwischen den Bauteilen aus CFK befindet sich ein Klebefilm, der durch die Induktionswirkung erwärmt wird und somit die Bauteile miteinander fixiert. Die vollständige Verklebung findet danach in einem Autoklaven statt.

Darüber hinaus sind zahlreiche Ideen zu der Integration und Automatisierung in das konventionelle Fertigungsverfahren entstanden, die den Prozess weiterhin effizienter machen und aus denen neue Projekte entstehen können. Für die industrielle Integration und Anwendung muss der Prozess vollständig automatisiert und weiter erprobt werden. Einige anwendungsspezifische Ideen werden im Kapitel [7.2](#) erläutert.

Aus den Versuchsreihen resultiert eine vollständig integrierte Herangehensweise, die sich nicht nur auf die Taktzeiten des Verklebungsprozesses fokussiert, sondern darüber hinaus auf mögliche Einflussfaktoren und die technischen Herausforderungen.

Das vorläufige Endprodukt ist ein funktionierender Prozess, der mittels elektromagnetischer Strahlung einen Klebefilm zwischen zwei Bauteilen aus CFK so erwärmt, dass diese für weiterführende Arbeiten handfest miteinander fixiert sind. Vor allem in der Luftfahrt können durch diese Anwendung Prozessverbesserungen erreicht werden.

## 7.2 Ausblick

Bei der Analyse der aktuell angewandten Erwärmungstechniken und vor allem bei den Versuchsreihen sind bzgl. der Prozessverbesserung und Automatisierung mehrere optionale Möglichkeiten und Ideen entstanden, mit denen das Thema Induktionserwärmung weiterführend behandelt werden könnte um einen automatisierten und qualitätsgesicherten Prozess zu entwickeln.

Darüber hinaus hat sich bei den Versuchen ein enormes Potential der Induktionstechnik in Bezug auf eine fortschrittliche Weiterentwicklung der industriellen Verfahren gezeigt. Das Resultat dieser wissenschaftlichen Arbeit ist ein Verfahren, um zwei Bauteile aus CFK miteinander zu fixieren. Allerdings sind die Versuche sehr anwendungsbezogen durchgeführt worden, sodass darüber hinaus in weiterführenden Projekten umfangreichere Untersuchungen durchgeführt werden könnten.

Dabei sollten vor allem weiterhin die Einflussfaktoren bestimmt werden. Die Wahl des Materials, der Materialdicke, des Lagenaufbaus (Lagenorientierung), des Werkzeuges und dem Abstand zwischen Induktor und Werkzeug sind bestimmende Faktoren, die den Induktionsprozess beeinflussen.

Um weiterhin anwendungsbezogen für die Verbindung von CFK Bauteilen in der Luftfahrt zu forschen kann der Prozess anwendungsspezifisch weiterentwickelt werden. Für die einzelnen Prozessschritte haben sich während der Versuche Ideen entwickelt, die zur Verbesserung des Systems führen können.

Die Positionierung als auch Fixierung der Versteifungselemente kann automatisiert in einem Prozess ablaufen. Bei der Recherche ergab sich, dass andere Unternehmen diesen Prozessschritt mit einem Industrieroboter realisieren. Dieser übernimmt durch seine Computersteuerung die Positionierung. Weiterhin können die Stringerelemente durch einen montierten Greifer gehalten und fixiert werden.

Es ist denkbar, dass diesem System ein Induktor implementiert werden kann, der in dem gleichen Schritt die Vorverklebung durchführt. Somit könnten die Positionierung, Fixierung und Vorerklebung in einem Prozessschritt durchgeführt werden.

Bezüglich der Qualitätssicherung besteht die Option, jede Verklebung durch ein zusätzlich montiertes Thermografie-Messsystem in Form einer Thermokamera oder eines Pyrometers zu überwachen und zu dokumentieren. Es ist sogar denkbar, dass der Induktionsprozess temperaturgesteuert mittels Datenübertragung des Messinstrumentes arbeitet. Die Induktion würde in diesem Fall so lange ausgeführt werden, bis sie von der Thermokamera oder dem Thermoelement das Signal erhält, die notwendige Temperatur erreicht zu haben. Als günstigere Option bestünde die Möglichkeit die Prozessüberwachung durch ein Pyrometer zu realisieren.

Um die Qualität der Klebverbindung zu überprüfen können sowohl eine rheometrische als auch eine Ultraschallprüfung durchgeführt werden. Diese gibt Aufschluss über die Qualität der Klebung und das Verhalten des Klebstoffes während des Prozesses. Anhand dieser Ergebnisse ist es denkbar, den Prozess weiterhin anzupassen und effektiver zu gestalten.



## 8 Literaturverzeichnis

- [01] B. Klein, Leichtbaukonstruktion, Vieweg + Teubner, 2009.
- [02] I. Rötzer, „Lasertechnik - Laserstrahlschweißen macht Flugzeuge leichter,“ *Fraunhofer Magazin*, 04.2004.
- [03] <http://www.a350xb.com/>.
- [04] <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2b/787fuselage.jpg>, „CFK Rumpf - Nieten und Kleben von Stringern und Spanten“.
- [05] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), „Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP)“.
- [06] <http://www.saristu.eu/>, „Pjoejekt SARISTU“.
- [07] A. E. Özkan, „Integration eines bewegten Thermokamerasystems in einen Autoklaven,“ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V..
- [08] G. Benkowsky, Induktionserwärmung, Berlin: Verlag Technik GmbH Berlin, 1990.
- [09] R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH, Handbuch Faserverbundwerkstoffe.
- [10] A. R. Upadhy, G. N. Dayananda, G. M. Kamalakannan, J. R. Setty und J. C. Daniel, „Autoclaves for AerospaceApplications: issues and Challenges,“ 2011.
- [11] H. Ucan, J. Bölke, S. Mahlzahl und M. Hanke, „Patent zur induktiven Vorverklebung von Omega-Stringern,“ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V..
- [12] K. Wesermarsch, „Technologie Zentrum Nordenham,“ Verlag Wilhelm Böning GmbH u. Co. KG.
- [13] Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. S. Böhm, „Klebertechnische Fertigungsverfahren,“ Universität Kassel.
- [14] G. Habenicht, „Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen,“ Springer, 2005.
- [15] K. Mazac, Betriebsanleitung für Geräte zur induktiven Erwärmung, 2006.
- [16] P. A. Tipler und G. Mosca, „Physik: für Wissenschaftler und Ingenieure,“ Spektrum Akademischer Verlag, 2009.
- [17] L. Bergmann und C. Schaefer, „Lehrbuch der Experimentalphysik – Elektromagnetismus,“ Walter de Gruyter, 2006.
- [18] M. Zülch, T. Zimmermann und W. Schinköthe, „Anwendungsgebiete der induktiven Erwärmung im Bereich der Kunststoffverarbeitung,“ IkkF.
- [19] BNV Bamberg.
- [20] Dipl.-Ing. Christian Krause/ ELDEC, „Einführung in das induktive Erwärmen“.

- [21] FFT Produktionssysteme GmbH & Co. KG, „Besprechung zum Thema der Stringerverklebung in Rumpfschalen,“ 29.01.2015.
- [22] Dr. Ing. M. Feldmann, „Faserverbundwerkstoffe und deren Verarbeitungsverfahren“, Universität Kassel.
- [23] Prof. Dr. P. Ermanni, Composites Technologien, 2007.
- [24] Hexcel, „Hexply M21 Product Data“.
- [25] S. Koll, „LEICA Absolute Tracker,“ *Quality Engineering*, 2013.
- [26] FFT EDAG Produktionssystem GmbH & Co. KG, „Positionsgenau variable Stringerpositionierung,“ Europäisches Patentamt, 36041 Fulda, 2013.
- [27] Airbus Operations GmbH, „Verfahren zur Positionierung von Stringern auf einer Flugzeughaut sowie eine Einrichtung zur Durchführung dieses Verfahrens,“ Deutsches Patentamt, 2013.
- [28] S. Mahlzahl, „Fertigungskonzepte für Paneele mit Omega-Stringern (OMEGA),“ Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik - DLR, Braunschweig, 2011.
- [29] Airbus Deutschland GmbH, „Verfahren zum Verbinden eines ersten Materials mit einem zweiten Material im Flugzeug,“ Deutsches Patent- und Markenamt, 2009.
- [30] Airbus Operations GmbH, „Verfahren und Vorrichtung zum Zusammenfügen von Bauteilen,“ Deutsches Patentamt, 2011.
- [31] Institut Für Verbundwerkstoffe GmbH; Peter Prof. Dr.-Ing. Mitschang, „Verfahren zur Verbindung von zwei jeweils aus einem Faser-Kunststoff-Verbund bestehenden Werkstücken,“ Deutsches Patentamt, 2010.
- [32] The Boeing Company; Paul S. Gregg, Marc R. Matsen, „Induction heating of composite materials,“ United States Patent, 1996.
- [33] T. Ströhlein, „Volumetrische Erwärmung von Kohlenstoffaserhalbzeugen,“ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., 2012.
- [34] Laser Projection Technologies (LPT), Inc..
- [35] P. Baisch, T. Dorawa, A. Gillessen, J. Piepenbrock, C. Barlag und T. Jacob, „Schlauchkerntechnik für Airbus CFK-Rumpf,“ Composite Technology Center Stade.
- [36] M. Rasche, „Der Zugscherversuch in der Klebetechnik“.
- [37] D. C273-61, „Standard Method of Shear Test,“ An American National Standard.
- [38] Projekt SARISTU, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
- [39] Flir Systems GmbH.
- [40] Automation Technology GmbH.
- [41] GOM - Gesellschaft für optische Messtechnik, „TRITOP – Optische 3D-Koordinatenmessmaschine“

- 
- [42] IFF GmbH, „Betriebsanleitung für Geräte zur induktiven Erwärmung; Typ EW 15“
  - [43] IFF GmbH, Ismaning, Betriebsanleitung für Induktoren
  
  - [44] T. Ahmed, D. Stavrov, H. Bersee und A. Beukers, „Induction welding of thermoplastic composites - overview,“ composites Part A: applied science and manufacturing, 2005.
  - [45] „EC Testing, Depth of Penetration & Current Density,“
  - [46] AIPI Airbus Process Instruction (06-02-006), „Structural Bonding of Thermoset and Thermoplastic Matrices Composite Parts“.
  - [47] AIRBUS - Hanna Grosser, „Interview zum Theme der Stringerverklebung in Rumpfschalen,“ 21.10.2014.
  - [48] Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, „Merkblatt 821 Edelstahl Rostfrei - Eigenschaften“.
  - [49] Cytec Industries Inc., „Produktinformationen FM 300“.
  - [50] Dr.-Ing. J. L. Muerza, Automatisiertes Fiberplacement (AFP), Fraunhofer-Institut für chemische Technologie (ICT).
  - [51] M. Frauenhofer, „Schnellhärtung struktureller Verbundklebungen mittels elektromagnetischer Wechselfelder,“ TU Braunschweig, 2010.
  - [52] R. Rudolf, P. Mitschang und M. Neitzel, „Induction heating of continuous carbon-fibre-reinforced thermoplastics,“ Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2000.